

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA**

**Departamento de Tecnología de Alimentos**



**CONTRIBUCIÓN AL ESTUDIO DE LA APLICACIÓN  
DE ULTRASONIDOS DE POTENCIA EN EL SECADO  
CONVECTIVO DE ALIMENTOS**

**TESIS DOCTORAL**

**Presentada por:**

**José Vicente García Pérez**

**Dirigida por:**

**Dr. D. Antonio Mulet Pons**

**Dr. D. Juan A. Cárcel Carrión**

**Valencia, 2007**





**DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA DE ALIMENTOS**  
**UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA**

**D. ANTONIO MULET PONS, CATEDRÁTICO DE UNIVERSIDAD DEL DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA, Y D. JUAN ANDRÉS CÁRCEL CARRIÓN, PROFESOR TITULAR DE ESCUELA UNIVERSITARIA DEL DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA**

**CERTIFICAN:** que la memoria titulada “Contribución al estudio de la aplicación de ultrasonidos de potencia en el secado convectivo de alimentos”, que para aspirar al grado de Doctor en Ciencia y Tecnología de los Alimentos presenta D. José Vicente García Pérez, realizada bajo nuestra dirección en el Departamento de Tecnología de Alimentos de la Universidad Politécnica de Valencia, cumple las condiciones adecuadas para su aceptación como Tesis Doctoral, por lo que

**AUTORIZAN:** Al interesado a su presentación en el Departamento de Tecnología de Alimentos de la Universidad Politécnica de Valencia.

Y para que conste a los efectos oportunos, presentamos la referida memoria, firmando el presente certificado en Valencia a 15 de marzo de 2007.

Fdo. D. Antonio Mulet Pons

Fdo. D. Juan Andrés Cárcel Carrión



A continuación me gustaría manifestar mi más sincero agradecimiento a algunas de las personas, que de una u otra manera, han contribuido a la realización de este trabajo.

En primer lugar a mis directores. Al Dr. Antonio Mulet Pons, Catedrático del Departamento de Tecnología de Alimentos, por darme la oportunidad de formar parte del grupo de investigación ASPA, por sus sabios consejos, su constante estímulo y su apoyo en todo momento que ha sido necesario. Al Dr. Juan Andrés Cárcel Carrión por su dedicación y ayuda desde el primer hasta el último momento. Gracias a ambos.

Al Ministerio de Educación, Cultura y Deporte por la beca FPU que me concedió, gracias a la cuál comencé con los estudios de doctorado. Así como también al programa Cantera de la Universidad Politécnica de Valencia donde fui incluido, gracias al cuál he podido continuar con este trabajo y me ha permitido llegar a ser profesor de esta Universidad.

A todos mis compañeros del Grupo ASPA, los que están y también los que un día estuvieron, por su ayuda en todo momento que ha sido necesaria y hacerme sentir como en casa. En especial, me gustaría agradecer a Ramón Peña su inestimable ayuda en el montaje del sistema de aplicación de ultrasonidos y por arreglar todo lo que rompo, y al Dr. José Bon por su saber hacer en la parte de modelización.

A mis compañeros de “camarote”, Gabi, Nieves, Tania, Laura, Pablo, Yolanda y Amaya, por aguantarme en los momentos menos lúcidos.

A mis compañeros de “tesis”, Laura, Tania, Carme, Leticia, Henry, Yolanda y Amaya, por compartir inquietudes y problemas cuando se han presentado.

A Marta Madrid, Verónica Martínez y Ana Guerrero por su aportación en la fase experimental de este trabajo.

A mis compañeros del Instituto de Acústica, en especial a Enrique Riera, por sus consejos e inestimable ayuda siempre que ha sido necesaria.

A todos mis compañeros de NTNU-SINTEF (Trondheim) por su cálida recepción y por compartir conmigo una experiencia inolvidable. En especial, me gustaría agradecer al Dr. Odilio Alves-Filho su guía en el trabajo experimental realizado.

A mis padres por su inagotable confianza y por darme todo lo que han tenido, nunca os defraudaré. A mis abuelos, gracias por quererme tanto y enseñarme tantas cosas. A todos porque gracias a vosotros soy quién soy.

En especial a Silvia por todo lo que me das, por quererme, ilusionarme y entenderme.

Azul un mar azul  
tan intenso como esa luz fugaz  
que hay en tu cara.

No hay nada mejor  
que sentir tu aire fresco resbalar  
por mis heridas.

Sueño con un final,  
me hundo en la oscuridad,  
y le pido a Dios  
verte una vez más.

Sin trampa ni cartón,  
como el gesto de aquel niño que un día fui,  
y sigo siendo.

El tiempo confirmó  
que mi vida sólo importa si estás tú  
siempre conmigo.

Horas de soledad  
generan esta ansiedad,  
como el girasol  
muere si tú no estás.

Las manos unidas  
sentir tu calor  
juntos para caminar  
juntos para soportar  
juntos para comenzar  
mil aventuras  
vivos para compartir  
vivos para discutir  
vivos para construir  
locos por vivir.

Sólo una cosa más  
quiero manifestar  
que gracias a ti  
puedo ser quién soy

*Manos Unidas (Vientos de Guerra, Saratoga, 1998)*



***A mis padres***

***A mi padre, gracias por enseñarme a trabajar***

***A mi madre, gracias por cuidarme siempre***



ÍNDICE DE FIGURAS .....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XVI
RESUMEN.....	i
ABSTRACT.....	ix
RESUM.....	xvi
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. SECADO CONVECTIVO.....	1
1.1.1. Generalidades.....	2
1.1.1.1. <i>Etapas de secado</i> .....	3
1.1.1.2. <i>Mecanismos de transferencia de materia</i> .....	4
1.1.2. Isotermas de sorción. Relación Humedad-Actividad de agua.....	5
1.1.2.1. <i>Concepto de actividad de agua</i> .....	5
1.1.2.2. <i>Isotermas de sorción</i> .....	7
1.1.2.3. <i>Modelización de las isotermas de sorción</i> .....	11
1.1.2.4. <i>Calor isostérico de sorción</i> .....	14
1.1.3. Modelización de las cinéticas de secado.....	16
1.1.3.1. <i>Modelo difusional</i> .....	18
1.1.3.2. <i>Modelo de Weibull</i> .....	20
1.1.4. Liofilización a presión atmosférica.....	21
1.1.4.1. <i>Descripción del proceso</i> .....	21
1.1.4.2. <i>Aplicaciones. Ventajas e inconvenientes</i> .....	21
1.1.5. Nuevas tecnologías aplicadas al secado convectivo.....	23
1.1.5.1. <i>Microondas</i> .....	23
1.1.5.2. <i>Radiofrecuencia</i> .....	25
1.1.5.3. <i>Radiación infrarroja</i> .....	25
1.1.5.4. <i>Ultrasonidos de potencia</i> .....	26
1.2. ULTRASONIDOS.....	27
1.2.1. Generalidades.....	27
1.2.1.1. <i>Propagación y tipos de onda</i> .....	28
1.2.1.2. <i>Parámetros ultrasónicos</i> .....	29
1.2.1.3. <i>Clasificación</i> .....	33

---

## ÍNDICE

1.2.2. Ultrasonidos de señal.....	34
1.2.2.1. <i>Aplicaciones en Tecnología de Alimentos</i> .....	34
1.2.3. Ultrasonidos de potencia.....	36
1.2.3.1. <i>Sistemas de generación</i> .....	36
1.2.3.2. <i>Sistemas de aplicación</i> .....	40
1.2.3.3. <i>Principales efectos producidos por los ultrasonidos de potencia en el secado convectivo</i> .....	45
1.2.3.4. <i>Aplicaciones en procesos de transferencia de materia en medios líquidos</i> .....	48
1.2.3.5. <i>Secado asistido por ultrasonidos de potencia</i> .....	54
1.2.3.6. <i>Otras aplicaciones en Tecnología de Alimentos</i> .....	58
1.3. <b>CONCLUSIONES</b> .....	62
2. <b>OBJETIVOS</b> .....	66
3. <b>MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	68
3.1. <b>MATERIAS PRIMAS</b> .....	68
3.1.1. Zanahoria.....	68
3.1.2. Albaricoque.....	69
3.1.3. Corteza de Limón.....	72
3.1.4. Caqui.....	73
3.1.5. Determinación experimental del contenido de humedad.....	74
3.2. <b>ISOTERMAS DE SORCIÓN</b> .....	76
3.2.1. Isotermas obtenidas a partir de referencias bibliográficas.....	76
3.2.1.1. <i>Zanahoria</i> .....	76
3.2.1.2. <i>Albaricoque</i> .....	77
3.2.1.3. <i>Caqui</i> .....	77
3.2.2. Determinación experimental de las isotermas de sorción de la corteza de limón.....	78
3.2.2.1. <i>Preparación de la muestra</i> .....	78
3.2.2.2. <i>Secado de las muestras</i> .....	79
3.2.2.3. <i>Determinación experimental de la actividad de agua</i> .....	79
3.2.2.4. <i>Determinación experimental de la humedad</i> .....	80
3.2.2.5. <i>Modelización de la isoterma de sorción</i> .....	81

3.2.2.6. <i>Calor isostérico de sorción</i> .....	81
3.3. <i>DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE SECADO</i> .....	83
3.3.1. Secadero convectivo convencional.....	83
3.3.2. Sistema ultrasónico de potencia.....	86
3.3.2.1. <i>Diseño del sistema de aplicación ultrasónico</i> .....	86
3.3.2.2. <i>Componentes</i> .....	89
3.3.2.3. <i>Caracterización</i> .....	91
3.3.3. Adaptación del secadero para la instalación del sistema de aplicación de ultrasonidos de potencia.....	93
3.3.4. Sistemas portamuestras.....	95
3.3.4.1. Sistema portamuestras para experiencias en lecho fluidizado. Cubeta móvil.....	96
3.3.4.2. Sistema portamuestras para las experiencias en lecho fijo.....	97
3.4. <i>EXPERIENCIAS DE SECADO</i> .....	99
3.4.1. Experiencias en lecho fluidizado.....	99
3.4.2. Experiencias con diferentes velocidades del aire de secado.....	99
3.4.3. Experiencias con diferentes temperaturas del aire de secado.....	100
3.4.4. Experiencias con diferentes densidades de carga másica.....	101
3.4.5. Experiencias con aplicación de diferentes potencias ultrasónicas.....	101
3.4.6. Cinéticas de secado.....	102
3.5. <i>LIOFILIZACIÓN A PRESIÓN ATMOSFÉRICA DE BACALAO</i> .....	103
3.5.1. Materia prima.....	103
3.5.2. Secadero convectivo con bomba de calor.....	105
3.5.3. Experiencias de secado.....	107
3.5.4. Medidas experimentales.....	108
3.5.4.1. <i>Humedad</i> .....	108
3.5.4.2. <i>Actividad de agua</i> .....	108
3.5.4.3. <i>Color</i> .....	108
3.5.4.4. <i>Densidad aparente</i> .....	109
3.5.4.5. <i>Capacidad de rehidratación</i> .....	109
3.5.4.6. <i>Encogimiento</i> .....	109
3.6. <i>MODELIZACIÓN DE LAS CINÉTICAS DE SECADO</i> .....	111
3.6.1. Modelos difusionales.....	111
3.6.1.1. <i>Modelos que no consideran la resistencia externa (SRE)</i> .....	112

---

3.6.1.2. <i>Modelos que consideran la resistencia externa (RE)</i> .....	114
3.6.2. Modelo de Weibull.....	115
3.6.3. Efecto de la temperatura.....	116
3.6.4. Influencia de la velocidad del aire en el coeficiente de transferencia de materia.....	116
3.6.5. Influencia de la temperatura del aire en el coeficiente de transferencia de materia.....	117
3.6.6. Identificación paramétrica. Métodos de optimización.....	118
3.6.7. Determinación de la bondad de los ajustes.....	118
3.6.8. Análisis estadístico.....	119
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	120
4.1. <i>CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE APLICACIÓN DE ULTRASONIDOS DE POTENCIA</i> .....	120
4.1.1. Caracterización previa.....	120
4.1.2. Estudio del comportamiento del sistema de aplicación de ultrasonidos en condiciones de trabajo.....	122
4.2. <i>ISOTERMAS DE SORCIÓN DE CORTEZA DE LIMÓN</i> .....	126
4.2.1. Datos experimentales. Influencia de la temperatura.....	126
4.2.2. Modelización incluyendo el efecto de la temperatura.....	128
4.2.3. Calor isostérico de sorción.....	133
4.3. <i>SECADO EN LECHO FLUIDIZADO ASISTIDO POR ULTRASONIDOS DE POTENCIA</i> .....	136
4.3.1. Secado de zanahoria y albaricoque en lecho fluidizado.....	136
4.3.2. Modelos SRE. Secado en lecho fluidizado.....	139
4.3.3. Modelo de Weibull. Secado en lecho fluidizado.....	141
4.3.4. Estimación de la energía de activación. Secado en lecho fluidizado....	144
4.4. <i>INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DEL AIRE EN EL SECADO ASISTIDO POR ULTRASONIDOS DE POTENCIA</i> .....	146
4.4.1. Influencia de la velocidad del aire en el campo acústico.....	146
4.4.2. Secado de diferentes productos, zanahoria, corteza de limón y caqui, a diferentes velocidades del aire .....	149
4.4.3. Modelos SRE. Influencia de la velocidad del aire.....	156
4.4.4. Modelo RE. Influencia de la velocidad del aire.....	169

---

4.4.5. Modelo de Weibull. Influencia de la velocidad del aire.....	174
4.5. <i>INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DEL AIRE EN EL SECADO ASISTIDO POR ULTRASONIDOS DE POTENCIA</i> .....	179
4.5.1. Secado de zanahoria a diferentes temperaturas.....	179
4.5.2. Modelo SRE. Influencia de la temperatura.....	183
4.5.3. Modelo RE. Influencia de la temperatura.....	185
4.5.4. Modelo de Weibull. Influencia de la temperatura.....	189
4.5.5. Estimación de la energía de activación. Influencia de la aplicación de ultrasonidos de potencia.....	191
4.6. <i>INFLUENCIA DE LA DENSIDAD DE CARGA MÁSCICA EN EL SECADO ASISTIDO POR ULTRASONIDOS DE POTENCIA</i> .....	194
4.6.1. Secado de zanahoria a diferentes densidades de carga máscica .....	194
4.6.2. Modelo SRE. Influencia de la densidad de carga.....	197
4.6.3. Modelo RE. Influencia de la densidad de carga.....	199
4.6.4. Modelo de Weibull. Influencia de la densidad de carga.....	203
4.7. <i>INFLUENCIA DEL NIVEL DE POTENCIA APLICADA EN EL SECADO ASISTIDO POR ULTRASONIDOS DE POTENCIA</i> .....	206
4.7.1. Secado acústico de zanahoria y corteza de limón a diferentes potencias.....	206
4.7.2. Modelos SRE. Influencia de la potencia .....	209
4.7.3. Modelos RE. Influencia de la potencia.....	213
4.7.4. Modelo de Weibull. Influencia de la potencia.....	218
4.8. <i>LIOFILIZACIÓN A PRESIÓN ATMOSFÉRICA DE BACALAO</i> .....	221
4.8.1. Influencia de la temperatura de secado en la cinética del proceso.....	222
4.8.1.1. <i>Cinéticas de secado de bacalao</i> .....	222
4.8.1.2. <i>Modelización del secado de bacalao</i> .....	224
4.8.1.3. <i>Estimación de la energía de activación. Secado de bacalao</i> .....	226
4.8.2. Influencia de la temperatura de secado en los parámetros de calidad .	228
4.8.2.1. <i>Color</i> .....	228
4.8.2.2. <i>Encogimiento</i> .....	231
4.8.2.3. <i>Densidad aparente</i> .....	232
4.8.2.4. <i>Capacidad de rehidratación</i> .....	233

---

**ÍNDICE**

5. CONCLUSIONES.....	236
6. RECOMENDACIONES.....	243
7. NOMENCLATURA.....	244
8. BIBLIOGRAFÍA.....	247
9. ANEJOS.....	277
<i>ANEJO 1. Isotermas de sorción de corteza de limón.....</i>	<i>277</i>
<i>ANEJO 2. Secado en lecho fluidizado de zanahoria y albaricoque.....</i>	<i>280</i>
<i>ANEJO 3. Influencia de la velocidad del aire en el secado asistido por ultrasonidos de potencia.....</i>	<i>284</i>
<i>ANEJO 4. Influencia de la temperatura del aire en el secado asistido por ultrasonidos de potencia.....</i>	<i>293</i>
<i>ANEJO 5. Influencia de la densidad de carga másica en el secado asistido por ultrasonidos de potencia.....</i>	<i>296</i>
<i>ANEJO 6. Influencia de la potencia aplicada en el secado asistido por ultrasonidos de potencia.....</i>	<i>299</i>
<i>ANEJO 7. Liofilización a presión atmosférica de bacalao.....</i>	<i>302</i>
<i>ANEJO 8. Método implícito de las diferencias finitas. Aplicación a la modelización del secado de alimentos considerando la resistencia externa.....</i>	<i>304</i>
<i>ANEJO 9. Publicaciones relacionadas con la tesis doctoral.....</i>	<i>313</i>

**ÍNDICE DE FIGURAS****1. INTRODUCCIÓN**

Figura 1.1.1. Curva de secado típica.	3
Figura 1.1.2. Influencia de la $a_w$ en reacciones de deterioro de alimentos.	7
Figura 1.1.3. Isotermas de adsorción y desorción.	9
Figura 1.2.1. Propagación de una onda ultrasónica. Parámetros característicos.	30
Figura 1.2.2. Clasificación del sonido en función de la frecuencia.	33
Figura 1.2.3. Efecto piezoeléctrico.	38
Figura 1.2.4. Transductor piezoeléctrico tipo sándwich.	39
Figura 1.2.5. Sistema tipo sonda para la aplicación de ultrasonidos de potencia en medios líquidos.	42
Figura 1.2.6. Sistema de aplicación de ultrasonidos de placa radiante.	44
Figura 1.2.7. Esquema de un sistema de aplicación ultrasónico de placa radiante.	45
Figura 1.2.8. Formación y crecimiento de burbujas de cavitación por difusión rectificada.	47
Figura 1.2.9. Aplicación de ultrasonidos por contacto directo entre el emisor y el alimento.	55
Figura 1.2.10. Esquema del secadero convectivo asistido por ultrasonidos de potencia con contacto directo y presión estática desarrollado por De la Fuente et al. (2006).	57

**3. MATERIALES Y MÉTODOS**

Figura 3.1.1. Dispositivo para el corte de la zanahoria en forma de cubos (8.5 mm de lado).	69
Figura 3.1.2. Esquema de la sección de un albaricoque. Dimensiones características.	70

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 3.1.3. Preparación de los albaricoques para las experiencias de secado.	70
Figura 3.1.4. Detalle de la corteza de limón.	72
Figura 3.1.5. Tipos de muestras de corteza de limón.	73
Figura 3.1.6. Preparación de las muestras de caqui.	74
Figura 3.2.1. Corteza de limón triturada.	79
Figura 3.2.2. Equipos NOVASINA para la medida de la actividad de agua.	80
Figura 3.3.1. Secadero convectivo Departamento Tecnología de Alimentos-UPV.	84
Figura 3.3.2. (a) Pantalla principal de la aplicación informática del secadero convectivo y (b) pantalla de selección de las variables de secado.	85
Figura 3.3.3. Sistema de aplicación de ultrasonidos de potencia.	86
Figura 3.3.4. Simulación con elementos finitos del modo de vibración del cilindro.	88
Figura 3.3.5. Disposición de partículas de poliestireno expandido cuando se aplica potencia al transductor.	89
Figura 3.3.6. Principales elementos del sistema ultrasónico de potencia.	90
Figura 3.3.7. Aplicación realizada para la visualización y adquisición de los parámetros eléctricos de la señal ultrasónica medidos por el watímetro.	91
Figura 3.3.8. Esquema del montaje experimental para la medida del campo acústico en el interior del cilindro vibrante.	92
Figura 3.3.9. Detalle del montaje del sistema ultrasónico de potencia en el secadero convectivo.	93
Figura 3.3.10. Secadero convectivo asistido por ultrasonidos de potencia. Aspecto general.	95
Figura 3.3.11. Sistema portamuestras de cubeta móvil.	96
Figura 3.3.12. Sistemas portamuestras para las experiencias de lecho fijo.	97
Figura 3.3.13. Anclaje de los sistemas portamuestras en las experiencias de lecho fijo.	98
Figura 3.5.1. Bloques de bacalao congelado.	103

Figura 3.5.2. Bacalao granulado.	104
Figura 3.5.3. Preparación de cubos de bacalao.	104
Figura 3.5.4. Esquema del secadero convectivo con bomba de calor.	106
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	
Figura 4.1.1. Distribución del campo acústico en el interior del cilindro vibrante cuando es excitado con una potencia eléctrica de 75 W.	121
Figura 4.1.2. Frecuencia y desfase de la señal eléctrica que excita el transductor ultrasónico (90 W), secado de láminas de corteza de limón a 40 °C y 1 m/s. Intervalo entre medidas 2 minutos.	123
Figura 4.1.3. Intensidad y voltaje de la señal eléctrica que excita el transductor ultrasónico (90 W), secado de láminas de corteza de limón a 40 °C y 1 m/s. Intervalo entre medidas 2 minutos.	124
Figura 4.2.1. Isotermas de sorción experimentales de corteza de limón obtenidas a diferentes temperaturas.	127
Figura 4.2.2. Isotermas calculadas con el modelo de GAB.	128
Figura 4.2.3. Modelización de la isoterma de sorción a 30 °C con los modelos de GAB, Halsey y Henderson.	130
Figura 4.2.4. Distribución de residuos obtenidos con el modelo de GAB. Datos experimentales a todas las temperaturas (20, 30, 40 y 50 °C).	131
Figura 4.2.5. Distribución de los residuos obtenidos con el modelo de Henderson. Datos experimentales a todas las temperaturas (20, 30, 40 y 50 °C).	132
Figura 4.2.6. Influencia del contenido de humedad en el calor isostérico de sorción de corteza de limón identificado por diferentes métodos.	134
Figura 4.3.1. Secado de cubos de zanahoria (8.5 mm de lado) en lecho fluidizado (10-14 m/s) a diferentes temperaturas (°C) sin (SUS) y con (US, 75 W, 21.7 kHz) aplicación de ultrasonidos.	137
Figura 4.3.2. Secado de octavos de albaricoque en lecho fluidizado (10-14 m/s) a diferentes temperaturas (°C) sin (SUS) y con (US, 75 W, 21.7 kHz) aplicación de ultrasonidos.	138
Figura 4.3.3. Influencia de la aplicación de ultrasonidos de potencia en el secado en lecho fluidizado (10-14 m/s) de zanahoria y albaricoque.	138

---

**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 4.3.4. Variación de la difusividad efectiva con la temperatura. Secado de cubos de zanahoria en lecho fluidizado.	144
Figura 4.3.5. Variación de la inversa del parámetro $\beta$ de Weibull con la temperatura. Secado de cubos de zanahoria en lecho fluidizado.	145
Figura 4.4.1. Evolución del nivel de presión sonora medio medido con la señal del micrófono filtrada (—) o sin filtrar (—).	148
Figura 4.4.2. Estructura del campo acústico en diferentes condiciones de flujo de aire.	149
Figura 4.4.3. Secado de discos de corteza de limón (espesor 10 mm) a diferentes velocidades de aire (m/s). Experiencias SUS a 40 °C.	151
Figura 4.4.4. Secado de cubos de zanahoria (8.5 mm de lado) a diferentes velocidades de aire (m/s). Experiencias SUS a 40 °C.	152
Figura 4.4.5. Secado de discos de corteza de limón (espesor 10 mm) a diferentes velocidades de aire (m/s). Experiencias US (75 W, 21.7 kHz) a 40 °C.	153
Figura 4.4.6. Comparación de cinéticas SUS y US (75 W, 21.7 kHz) de los diferentes productos.	154
Figura 4.4.7. Influencia de la velocidad del aire en la difusividad efectiva, modelo SRE. Secado de cubos de zanahoria, experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz) a 40 °C.	157
Figura 4.4.8. Modelización del secado de corteza de limón, modelos SRE para lámina infinita y cilindro finito. Experiencia US (75 W, 21.7 kHz), 7 m/s y 40 °C.	161
Figura 4.4.9. Influencia de la velocidad del aire en la difusividad efectiva (modelo SRE). Secado de discos de corteza de limón y cilindros de caqui, experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz).	162
Figura 4.4.10. Modelización de las cinéticas de secado de caqui con el modelo SRE. Experiencias SUS realizadas a 0.5 y 12 m/s y 50 °C.	167
Figura 4.4.11. Valores experimentales y calculados con los modelos SRE y RE, secado de cilindros de caqui. Experiencia US (75 W, 21.7 kHz) a 0.5 m/s y 40 °C.	170
Figura 4.4.12. Difusividad efectiva en experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz) de secado de caqui a 50 °C.	172
Figura 4.4.13. Coeficiente de transferencia de materia ( $k$ , m/s) en experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz) de secado de caqui a 50 °C.	173

---

**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 4.4.14. Evolución del parámetro cinético del modelo de Weibull ( $\beta$ ) con la velocidad del aire, experiencias de secado de diferentes productos.	175
Figura 4.4.15. Evolución del parámetro de forma del modelo de Weibull ( $\alpha$ ) con la velocidad del aire, experiencias de secado de diferentes productos.	176
Figura 4.4.16. Valores experimentales y calculados con los modelos de Weibull y difusional SRE, secado de cubos de zanahoria (8.5 mm de lado). Experiencia SUS a 0.5 m/s y 40 °C.	178
Figura 4.5.1. Secado de cubos de zanahoria (8.5 mm de lado) a 1 m/s y diferentes temperaturas (°C), sin aplicación de ultrasonidos (SUS).	180
Figura 4.5.2. Secado de cubos de zanahoria (8.5 mm de lado) a 1 m/s y diferentes temperaturas (°C), con aplicación de ultrasonidos (US, 75 W, 21.7 kHz).	181
Figura 4.5.3. Secado de cubos de zanahoria (8.5 mm de lado). Experiencias SUS y US.	182
Figura 4.5.4. Cinéticas de secado de zanahoria, modelos SRE y RE. Experiencia SUS, 1 m/s y 30 °C.	186
Figura 4.5.5. Influencia de la temperatura del aire en los parámetros del modelo de Weibull ( $\alpha$ y $\beta$ ), secado de zanahoria. Experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz) a 1 m/s.	190
Figura 4.5.6. Contenido de humedad experimental y calculado con los modelos SRE y Weibull, secado de zanahoria. Experiencia SUS a 1 m/s y 30 °C.	191
Figura 4.5.7. Variación de $D_e$ con la temperatura, modelo RE. Secado de cubos de zanahoria, experiencias US (75 W, 21.7 kHz) y SUS.	192
Figura 4.6.1. Secado de zanahoria a diferentes densidades de carga ( $\text{kg/m}^3$ ). Experiencias SUS, 1 m/s y 40 °C.	195
Figura 4.6.2. Secado de zanahoria a diferentes densidades de carga ( $\text{kg/m}^3$ ). Experiencias US (75 W, 21.7 kHz), 1 m/s y 40 °C.	196
Figura 4.6.3. Secado de zanahoria a diferentes densidades de carga ( $\text{kg/m}^3$ ). Experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz).	197
Figure 4.6.4. Contenido de humedad experimental y calculado con los modelos SRE y RE, secado de zanahoria. Experiencia SUS, 1 m/s, 40 °C y 60 $\text{kg/m}^3$ .	200
Figura 4.6.5. Influencia de la densidad de carga en la difusividad efectiva, modelo RE. Secado de zanahoria, experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz),	201

---

**ÍNDICE DE FIGURAS**

40 °C y 1 m/s.	
Figura 4.6.6. Valores medios de $k$ e intervalos LSD ( $p < 0.05$ ), modelo RE. Experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz), 40 °C y 1 m/s.	202
Figura 4.6.7. Influencia de la densidad de carga en los parámetros del modelo de Weibull ( $\alpha$ y $\beta$ ), secado de zanahoria. Experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz), 1 m/s y 40 °C.	204
Figure 4.6.8. Contenido de humedad experimental y calculado con los modelos SRE y de Weibull. Secado de zanahoria, experiencia SUS a 1 m/s, 40 °C y 60 kg/m <sup>3</sup> .	205
Figura 4.7.1. Influencia de la potencia ( $W$ ) en el secado de zanahoria (12 kg/m <sup>3</sup> ) y corteza de limón (36 kg/m <sup>3</sup> ) a 1 m/s, 40 °C.	207
Figura 4.7.2. Secado de láminas de corteza de limón (36 kg/m <sup>3</sup> ) a 1 m/s y 40 °C, a diferentes niveles de potencia ( $W$ ).	208
Figura 4.7.3. Influencia de la potencia ( $W$ ) en la difusividad efectiva, modelo SRE. Experiencias de secado de zanahoria y corteza de limón a 40 °C y 1 m/s.	210
Figura 4.7.4. Cinéticas de secado de láminas de corteza de limón, modelos SRE y RE. Experiencia US, 10 W, 1 m/s y 30 °C.	212
Figura 4.7.5. Influencia de la potencia ( $W$ ) en $D_e$ y $k$ , modelo RE. Experiencias de secado de zanahoria (12 kg/m <sup>3</sup> ), 40 °C y 1 m/s.	216
Figura 4.7.6. Influencia de la potencia ( $W$ ) en $D_e$ y $k$ , modelo RE. Experiencias de secado de corteza de limón (36 kg/m <sup>3</sup> ), 40 °C y 1 m/s.	217
Figura 4.7.7. Influencia de la potencia ultrasónica en los parámetros del modelo de Weibull ( $\alpha$ y $\beta$ ). Experiencias de secado de zanahoria (12 kg/m <sup>3</sup> ), 40 °C y 1 m/s.	219
Figura 4.7.8. Influencia de la potencia ultrasónica en los parámetros del modelo de Weibull ( $\alpha$ y $\beta$ ). Experiencias de secado de corteza de limón (36 kg/m <sup>3</sup> ), 40 °C y 1 m/s.	220
Figura 4.8.1. Secado de cubos bacalao (5 mm de lado) a diferentes temperaturas (°C).	223
Figura 4.8.2. Cinéticas de secado de cubos bacalao (5 mm de lado) combinando diferentes temperaturas (°C).	224
Figura 4.8.3. Influencia de la temperatura en la difusividad efectiva, modelo SRE. Secado de bacalao.	227

---

**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 4.8.4. Evolución de la luminosidad de las muestras de bacalao durante las experiencias de secado realizadas a diferentes temperaturas (°C).	229
Figura 4.8.5. Luminosidad media y desviaciones estándar para las muestras de bacalao granulado secadas a diferentes temperaturas (°C) para contenidos de humedad superiores a 40 kg w/100 kg producto.	230
Figura 4.8.6. Diferencias entre el color de muestras liofilizadas y secadas por aire caliente.	230
Figura 4.8.7. Ratio de encogimiento ( $V_f/V_o$ ) para los cubos de bacalao secados a diferentes temperaturas (°C).	231
Figura 4.8.8. Densidad aparente del lecho de muestras de bacalao granulado secadas a diferentes temperaturas (°C).	233
Figura 4.8.9. Capacidad de rehidratación de las muestras de bacalao granulado secadas a diferentes temperaturas (°C).	234

**9. ANEJOS**

Figura A1.1. Modelización de la isoterma de sorción a 20 °C con los modelos de GAB, Halsey y Henderson.	277
Figura A1.2. Modelización de la isoterma de sorción a 40 °C con los modelos de GAB, Halsey y Henderson.	277
Figura A1.3. Modelización de la isoterma de sorción a 50 °C con los modelos de GAB, Halsey y Henderson.	278
Figura A1.4. Distribución de residuos obtenidos con el modelo de Halsey. Datos experimentales a todas las temperaturas (20, 30, 40 y 50 °C).	278
Figura A1.5. Distribución de residuos obtenidos con el modelo de Oswin. Datos experimentales a todas las temperaturas (20, 30, 40 y 50 °C).	279
Figura A1.6. Distribución de residuos obtenidos con el modelo de Ratti. Datos experimentales a todas las temperaturas (20, 30, 40 y 50 °C).	279
Figura A2.1. Velocidad de secado de cubos de zanahoria (8.5 mm de lado). Experiencias SUS a diferentes temperaturas (°C).	280
Figura A2.2. Velocidad de secado de cubos de zanahoria (8.5 mm de lado). Experiencias US (75 W, 21.7 kHz) a diferentes temperaturas (°C).	280

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura A2.3. Velocidad de secado de octavos de albaricoque. Experiencias SUS a diferentes temperaturas (°C).	281
Figura A2.4. Velocidad de secado de octavos de albaricoque. Experiencias US (75 W, 21.7 kHz) a diferentes temperaturas (°C).	281
Figura A2.5. Secado de cubos de zanahoria (8.5 mm de lado). Experiencia SUS a 35 °C en lecho fluidizado.	282
Figura A2.6. Variación de la difusividad efectiva con la temperatura. Secado de octavos de albaricoque en lecho fluidizado.	282
Figura A2.7. Variación de la inversa del parámetro $\beta$ del modelo de Weibull con la temperatura. Secado de octavos de albaricoque en lecho fluidizado.	283
Figura A3.1. Secado de cubos de zanahoria (lado 17 mm). Experiencias SUS a diferentes velocidades de aire (m/s) y 40 °C.	284
Figura A3.2. Secado de cubos de zanahoria (lado 17 mm). Experiencias US (75 W, 21.7 kHz) a diferentes velocidades de aire (m/s) y 40 °C.	284
Figura A3.3. Secado de cubos de zanahoria (lado 8.5 mm). Experiencias SUS a diferentes velocidades de aire (m/s) y 40 °C.	285
Figura A3.4. Secado de cubos de zanahoria (lado 8.5 mm). Experiencias US (75 W, 21.7 kHz) a diferentes velocidades de aire (m/s) y 40 °C.	285
Figura A3.5. Secado de discos de corteza de limón (espesor 10 mm). Experiencias SUS a diferentes velocidades de aire (m/s) y 40 °C.	286
Figura A3.6. Secado de discos de corteza de limón (espesor 10 mm). Experiencias US (75 W, 21.7 kHz) a diferentes velocidades de aire (m/s) y 40 °C.	286
Figura A3.7. Secado de cilindros de caqui (altura 30 mm y diámetro 13 mm). Experiencias SUS a diferentes velocidades de aire (m/s) y 50 °C.	287
Figura A3.8. Secado de cilindros de caqui (altura 30 mm y diámetro 13 mm). Experiencias US (75 W, 21.7 kHz) a diferentes velocidades de aire (m/s) y 50 °C.	287
Figura A3.9. Valores experimentales y calculados con los modelos SRE de lámina infinita y cilindro finito, secado de corteza de limón. Experiencia US (75 W, 21.7 kHz) a 9 m/s y 40 °C.	290
Figura A3.10. Modelización de las cinéticas de secado de caqui con los modelos SRE y RE. Experiencia US a 0.5 m/s y 50 °C.	290

---

**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura A4.1. Secado de cubos de zanahoria (8.5 mm de lado). Experiencia US (75 W, 21.7 kHz) a 50 °C y 1 m/s.	293
Figura A4.2. Contenido de humedad experimental y calculado con los modelos SRE y RE, secado de zanahoria. Experiencia SUS a 1 m/s y 30 °C.	293
Figura A4.3. Influencia de la temperatura en el coeficiente de transferencia de materia ( $k$ , kg w/m <sup>2</sup> /s), secado de zanahoria. Experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz) a 1 m/s.	294
Figura A4.4. Variación de $D_e$ con la temperatura, modelo SRE. Secado de cubos de zanahoria, experiencias US (75 W, 21.7 kHz) y SUS.	295
Figura A4.5. Variación de la inversa del parámetro $\beta$ del modelo de Weibull con la temperatura. Secado de cubos de zanahoria, experiencias US (75 W, 21.7 kHz) y SUS.	295
Figure A5.1. Cinéticas de secado de zanahoria, modelos SRE y RE. Experiencia SUS a 1 m/s, 40 °C y 60 kg/m <sup>3</sup> .	296
Figure A5.2. Cinéticas de secado de zanahoria, modelos SRE y Weibull. Experiencia SUS a 1 m/s, 40 °C y 60 kg/m <sup>3</sup> .	296
Figura A6.1. Secado de zanahoria (12 kg/m <sup>3</sup> ) a 1 m/s y 40 °C variando la potencia aplicada (W).	299
Figure A6.2. Humedad experimental y calculada, modelos SRE y RE, secado de zanahoria. Experiencia US a 90 W, 40 °C, 1 m/s y 12 kg/m <sup>3</sup> .	299
Figura A7.1. Secado de bacalao granulado a diferentes temperaturas (°C).	302
Figura A7.2. Relación experimental entre actividad de agua y humedad a 25 °C para bacalao granulado secado a diferentes temperaturas y modelo de GAB.	302
Figura A7.3. Influencia de la temperatura en la inversa del parámetro $\beta$ del modelo de Weibull, secado de bacalao.	303
Figura A8.1. Selección de nodos característicos de la región en estudio.	305



**ÍNDICE DE TABLAS****3. MATERIALES Y MÉTODOS**

Tabla 3.2.1. Datos bibliográficos utilizados para la modelización de la isoterma de sorción de zanahoria (Zhang et al., 1996).	76
Tabla 3.2.2. Parámetros del modelo de GAB obtenidos de la modelización de los datos experimentales de actividad de agua y humedad presentados por Tsami et al. (1990).	77
Tabla 3.2.3. Parámetros del modelo de GAB obtenidos de la modelización de los datos experimentales de actividad de agua y humedad presentados por Cárcel et al. (2005).	78
Tabla 3.5.1. Experiencias de secado de bacalao.	107

**4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Tabla 4.2.1. Parámetros del modelo de GAB identificados.	126
Tabla 4.2.2. Modelización de las isotermas de sorción de corteza de limón considerando el efecto de la temperatura en los modelos.	129
Tabla 4.3.1. Modelización de las cinéticas de secado en lecho fluidizado de zanahoria. Modelo SRE para geometría cúbica.	139
Tabla 4.3.2. Modelización de las cinéticas de secado en lecho fluidizado de octavos de albaricoque. Modelo SRE para geometría de lámina infinita.	140
Tabla 4.3.3. Modelización de las cinéticas de secado en lecho fluidizado de zanahoria. Modelo de Weibull.	142
Tabla 4.3.4. Modelización de las cinéticas de secado en lecho fluidizado de albaricoque. Modelo de Weibull.	142
Tabla 4.3.5. Energía de activación (kJ/mol) identificada a partir de los modelos difusional SRE y Weibull, experiencias SUS y US de zanahoria y albaricoque.	145
Tabla 4.4.1. Modelización de las cinéticas de secado de cilindros de caqui (2L = 30 mm, R = 6.5 mm), modelo SRE. Experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz) a 50 °C.	165

---

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 4.4.2. Modelización de las cinéticas de secado de cilindros de caqui, modelo RE. Experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz) a 50 °C.	169
Tabla 4.5.1. Modelización de las cinéticas de secado de zanahoria, modelo SRE. Experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz) a 1 m/s.	183
Tabla 4.5.2. Valores de difusividad efectiva identificados por Mulet et al. (2003a) a partir de datos experimentales de Gallego-Juárez et al. (1999). Secado láminas de zanahoria con (US) y sin (SUS) aplicación de ultrasonidos.	185
Tabla 4.5.3. Modelización de las cinéticas de secado de zanahoria, modelo RE. Experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz) a 1 m/s.	186
Tabla 4.6.1. Modelización de las cinéticas de secado de cubos de zanahoria (2L = 8.5 mm), modelo SRE. Experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz) a 40 °C y 1 m/s.	198
Tabla 4.7.1. Modelización de las cinéticas de secado de zanahoria y corteza de limón, modelo RE. Experiencias a 40 °C y 1 m/s.	214
Tabla 4.8.1. Modelización de las cinéticas de secado de cubos de bacalao, modelos SRE y Weibull.	225
Tabla 4.8.2. Valores de energía de activación (kJ/mol) identificados en las experiencias de secado de bacalao.	228

**9. ANEJOS**

Tabla A2.1. Referencias bibliográficas de valores de energía de activación de la zanahoria y el albaricoque.	283
Tabla A3.1. Modelización de las cinéticas de secado de cubos de zanahoria (2L = 17 mm), modelo SRE. Experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz) a 40 °C.	288
Tabla A3.2. Modelización de las cinéticas de secado de cubos de zanahoria (2L = 8.5 mm), modelo SRE. Experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz) a 40 °C.	288
Tabla A3.3. Modelización de las cinéticas de secado de discos de corteza de limón, modelo SRE geometría cilindro finito (2L = 10 mm y 2R = 18.9 mm). Experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz) a 40 °C.	289
Tabla A3.4. Modelización de las cinéticas de secado de discos de corteza de limón, modelo SRE geometría lámina infinita (L = 10 mm). Experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz) a 40°C.	289

---

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla A3.5. Modelización del secado de cubos de zanahoria (2L = 17 mm), modelo de Weibull. Experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz) a 40 °C.	291
Tabla A3.6. Modelización del secado de cubos de zanahoria (2L = 8.5 mm), modelo de Weibull. Experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz) a 40 °C.	291
Tabla A3.7. Modelización del secado de discos de corteza de limón (2L = 10 mm), modelo de Weibull. Experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz) a 40 °C.	292
Tabla A3.8. Modelización del secado de cilindros de caqui (2L = 30 mm, R = 6.5 mm), modelo de Weibull. Experiencias SUS y US a 50 °C.	292
Tabla A4.1. Modelización de las cinéticas de secado de cubos de zanahoria (2L = 8.5 mm), modelo de Weibull. Experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz) a 1 m/s.	294
Tabla A5.1. Modelización de las cinéticas de secado de cubos de zanahoria (2L = 8.5 mm), modelo RE. Experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz) a 40 °C y 1 m/s.	297
Tabla A5.2. Modelización de las cinéticas de secado de cubos de zanahoria, modelo de Weibull. Experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz) a 40 °C y 1 m/s.	298
Tabla A6.1. Modelización de las cinéticas de secado de zanahoria y corteza de limón, modelo SRE. Experiencias a 1 m/s y 40 °C.	300
Tabla A6.2. Modelización de las cinéticas de secado de zanahoria y corteza de limón, modelo de Weibull. Experiencias a 1 m/s y 40 °C.	301



**RESUMEN**

El secado convectivo de alimentos presenta todavía algunas limitaciones que dificultan su aplicación en campos específicos. Entre ellas, se encuentra la baja velocidad de secado y la pérdida de calidad del producto. Algunas de estas limitaciones pueden salvarse con la introducción de nuevas tecnologías usadas como fuentes adicionales de energía. Entre otras, destacan los ultrasonidos de potencia, que pueden influir en la velocidad de secado sin producir un aumento significativo de la temperatura del material. Esto favorece su aplicación en el secado de materiales sensibles al calor o en procesos de secado realizados a bajas temperaturas, como por ejemplo la liofilización a presión atmosférica.

Los ultrasonidos de potencia se han aplicado con el objetivo de influir en la transferencia de materia en sistemas sólido-líquido, como el salado de carne y queso, la deshidratación osmótica de frutas y diversos procesos de extracción. En cambio, las aplicaciones de ultrasonidos de potencia en sistemas sólido-gas, como es el caso del secado convectivo, son menos frecuentes debido a ciertas limitaciones que dificultan enormemente el desarrollo de esta tecnología. Entre otras, destaca la diferencia de impedancias entre los sistemas de aplicación de ultrasonidos y el aire, que dificulta la transmisión de las ondas, y la elevada absorción de energía acústica del aire. Dichas limitaciones pueden superarse a partir del adecuado diseño del sistema de aplicación de ultrasonidos.

Asociados a la aplicación de ultrasonidos de potencia, hay una serie de efectos que pueden influir en los procesos de transferencia de materia que tienen lugar durante el secado convectivo. Por un lado, la resistencia externa a la transferencia de materia puede verse afectada por las velocidades oscilantes, microcorrientes y variaciones de presión que producen los ultrasonidos en las interfases sólido-gas. Por otro lado, la resistencia interna puede disminuir por los ciclos de compresión y descompresión que producen los ultrasonidos en los materiales (efecto esponja), por los efectos en las interfases de los espacios

intercelulares, e incluso por la cavitación que puede ayudar a eliminar el agua más fuertemente retenida.

El principal objetivo de este trabajo ha sido determinar el efecto de los ultrasonidos de potencia en procesos de secado convectivo estableciendo la influencia de las principales variables del proceso.

Para la consecución de este objetivo se pretendió diseñar un nuevo sistema de aplicación de ultrasonidos que consiguiera una adecuada transmisión de energía ultrasónica al medio. El diseño se basó en la idea de conseguir que las propias paredes de la cámara de secado fueran las encargadas de radiar la energía ultrasónica, es decir, que la cámara de secado fuera el elemento vibrante y que transmitiera la energía a las partículas presentes en su interior. Su construcción se realizó a partir de los cálculos de diseño realizados en 2 dimensiones por elementos finitos utilizando el código ANSYS. Así, se desarrolló un sistema de aplicación ultrasónico consistente en un cilindro de aluminio (120 mm de diámetro externo, 10 mm de espesor y una longitud de 310 mm) vibrando a flexión, excitado por un vibrador compuesto por un transductor tipo sándwich y un amplificador mecánico. Antes de su montaje en el secadero, el sistema de aplicación fue caracterizado con un puente de impedancias y, además, suministrándole una potencia eléctrica de 90 W (frecuencia 21.8 kHz, voltaje 60 V, intensidad 1.55 A, desfase 4° e impedancia 329  $\Omega$ ). También se estudió la estructura del campo acústico generado en el interior de la cámara de secado, determinándose un valor medio de presión sonora de 154.3 dB cuando se aplicó una potencia eléctrica de 75 W. Este valor se aproximó mucho al valor predicho a partir de la modelización con elementos finitos (156.3 dB).

Para la instalación del sistema de aplicación se modificó un secadero convectivo tradicional. En la adaptación, se consiguieron tanto unas condiciones de trabajo adecuadas para el sistema de aplicación de ultrasonidos como mantener el proceso de pesada automático existente en el secadero.

Se realizaron experiencias de secado de diferentes productos: zanahoria, albaricoque, caqui y corteza de limón. Las isothermas de sorción de estos productos se obtuvieron de la bibliografía excepto para el caso de la corteza de limón del que no se encontraron referencias bibliográficas. En este caso, se determinaron experimentalmente las isothermas de sorción a diferentes temperaturas (20, 30, 40 y 50 °C), utilizando higrómetros eléctricos.

El modelo de GAB fue el que mejor describió los datos de sorción experimentales de corteza de limón. Por otra parte, se identificó la influencia de la temperatura en la isoterma. El calor isostérico de sorción fue determinado a partir de la ecuación de Clausius-Clapeyron, mediante métodos de cálculo diferencial e integral y también usando la ecuación de Riedel. Las estimaciones del calor isostérico con los diferentes métodos fueron similares.

La aplicación de ultrasonidos de potencia no produjo ninguna influencia en las cinéticas de secado en lecho fluidizado de cubos de zanahoria (8.5 mm de lado) y octavos de albaricoque realizadas a diferentes temperaturas (30, 35, 40, 45, 50, 55 y 60 °C) y velocidades de aire comprendidas entre 10 y 14 m/s. Los valores de energía de activación obtenidos para estos productos fueron similares a otros mostrados por la bibliografía y no se encontraron diferencias significativas entre los obtenidos para las experiencias con (US, 75 W, 21.7 kHz) y sin aplicación de ultrasonidos de potencia (SUS).

A la vista de estos resultados y con el fin de establecer la causa por la que no se encontraron diferencias con la aplicación de ultrasonidos, se evaluó la influencia de la velocidad del aire en el campo acústico generado en el interior de la cámara de secado. Así, se identificó un descenso del nivel medio de presión sonora con el aumento de la velocidad del aire. A partir de 8 m/s este valor permaneció constante. Por lo tanto, el aumento de la velocidad del aire supuso un descenso de la energía acústica disponible para las partículas.

Por otro lado, se realizaron experiencias de secado con diferentes productos (zanahoria, caqui y corteza de limón) y geometrías (cubos, cilindros y discos) a

velocidades de aire comprendidas entre 0.5 y 14 m/s. La velocidad del aire influyó en las cinéticas SUS de los distintos productos hasta una velocidad de aire próxima a 5 m/s. Dicho umbral se estableció partir de los valores de difusividad efectiva identificados con un modelo difusional sin considerar la resistencia externa a la transferencia de materia (SRE). La aplicación de ultrasonidos de potencia (75 W, 21.7 kHz) aumentó los valores de difusividad efectiva ( $D_e$ ) identificados con el modelo SRE en el secado de zanahoria y caqui únicamente para las experiencias realizadas a bajas velocidades de aire ( $< 6$  m/s). Es decir, a altas velocidades de aire, y por tanto menores niveles de energía acústica, la influencia de los ultrasonidos en la cinética de secado de estos productos fue despreciable. Sin embargo, en las experiencias de secado de corteza de limón, la aplicación de ultrasonidos de potencia aumentó de forma significativa ( $p < 0.05$ ) los valores de difusividad efectiva tanto a bajas como altas velocidades de aire. La mayor sensibilidad de la corteza de limón a los efectos de los ultrasonidos posiblemente esté determinada por su estructura.

Una de las propiedades estructurales que puede tener mayor importancia en los efectos de los ultrasonidos es la porosidad de los materiales. Los productos de mayor porosidad pueden ser más sensibles a los ciclos de compresión y descompresión producidos por las ondas ultrasónicas, facilitando el movimiento del agua por sus grandes espacios intercelulares. En productos de baja porosidad, los espacios intercelulares son de menor tamaño y, por tanto, presentan una mayor resistencia al movimiento del agua, necesitando mayores niveles de energía acústica para afectar a dicha resistencia.

La influencia de la porosidad también puede explicarse por el hecho de que, en los productos más porosos, la absorción de energía acústica por el material sería mayor. De esta manera, aumentaría la energía disponible en el interior del material produciendo compresiones y descompresiones más intensas (efecto esponja) que favorecerían la salida del agua y por tanto, la disminución de la resistencia interna. De igual manera, los efectos de los ultrasonidos en las interfases sólido-gas de los materiales porosos serían más intensos al presentar

una mayor red interna de espacios intercelulares, lo que también reduciría la resistencia interna a la transferencia de materia. En este sentido, se comprueba que la corteza de limón al presentar una mayor porosidad que la zanahoria y el caqui es más sensible al efecto de los ultrasonidos.

Los modelos difusionales en los que no se consideró la resistencia externa a la transferencia de materia (SRE) no ajustaron de forma adecuada las experiencias de secado realizadas a bajas velocidades de aire. Es por esto que se plantearon otros modelos difusionales, en función de la geometría de las partículas, considerando la resistencia externa a la transferencia de materia (modelo RE). Estos modelos fueron resueltos mediante un método implícito de diferencias finitas utilizando el lenguaje de programación disponible en Matlab. Los modelos RE proporcionaron porcentajes de varianza explicada superiores al 99 % y errores medios relativos inferiores al 10 % en todos los casos.

Los valores de difusividad efectiva ( $D_e$ ) y el coeficiente de transferencia de materia ( $k$ ) identificados con el modelo RE en el secado de caqui fueron significativamente ( $p < 0.05$ ) más elevados en las experiencias US (75 W, 21.7 kHz) realizadas a velocidades de aire inferiores a 6 m/s que en las experiencias SUS a la misma velocidad. Por lo tanto, cuando se utilizaron velocidades de aire bajas, la aplicación de ultrasonidos de potencia influyó de forma significativa tanto en la resistencia interna como externa a la transferencia de materia.

La influencia de la temperatura del aire en el secado acústico fue evaluada a partir de experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz) de secado de cubos de zanahoria (8.5 mm de lado) realizadas a 30, 40, 50, 60 y 70 °C y 1 m/s. La aplicación de ultrasonidos de potencia aumentó de forma significativa ( $p < 0.05$ ) los valores de  $D_e$  y  $k$  para las experiencias realizadas a temperaturas inferiores a 60 °C. A medida que la temperatura aumentó la influencia de los ultrasonidos fue disminuyendo y desapareció en las experiencias de 70 °C. Los valores de difusividad efectiva identificados en las experiencias US no se ajustaron bien a la ecuación de Arrhenius. Los valores de difusividad efectiva identificados a altas

temperaturas (60-70 °C) no siguieron la relación lineal mostrada por los valores obtenidos a bajas temperaturas (30, 40 y 50 °C).

Otro de los parámetros cuya influencia en el secado acústico se evaluó fue la densidad de carga másica. Con tal objetivo, se realizaron experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz) de secado de cubos de zanahoria (8.5 mm de lado) a 11 niveles diferentes de densidades de carga: 12, 24, 36, 42, 48, 60, 72, 84, 96, 108 y 120 kg/m<sup>3</sup> (1 m/s y 40 °C). La densidad de carga influyó de forma significativa ( $p < 0.05$ ) en la cinética del proceso. Así, la velocidad de secado disminuyó a medida que aumentó la carga de partículas presente en la cámara de secado. A partir de las modelizaciones realizadas con el modelo RE, se pudo identificar que la densidad de carga no influyó en la  $D_e$ , pero sí en el coeficiente de transferencia de materia ( $k$ ). El incremento de partículas en las bandejas de la cámara de secado pudo dificultar el flujo de aire alrededor de las partículas, incrementando la resistencia externa y, por tanto, disminuyendo  $k$ .

La aplicación de ultrasonidos de potencia aumentó de forma significativa ( $p < 0.05$ ) tanto  $k$  como  $D_e$  en todo el rango de densidades de carga evaluado, aunque las diferencias dejaron de ser estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ) a densidades de carga superiores a 90 kg/m<sup>3</sup>. Este hecho puede ser consecuencia de la disminución de la cantidad de energía ultrasónica que le llega a cada partícula por el aumento de la masa presente en la cámara de secado.

El último de los parámetros evaluado para determinar su influencia en el secado convectivo asistido por ultrasonidos fue el nivel de potencia ultrasónica aplicada. Se realizaron experiencias de secado de cubos de zanahoria (8.5 mm de lado) y láminas de corteza de limón (7 mm de espesor) a 40 °C y 1 m/s variando el nivel de potencia aplicado: 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 y 90 W. A partir de estas cinéticas se encontró una influencia significativa ( $p < 0.05$ ) del nivel de potencia aplicado en el secado de estos productos. Así, en el caso de la corteza de limón se estableció una relación lineal entre  $D_e$  o  $k$  y la potencia aplicada, válida para todo el rango evaluado. Sin embargo, en el caso de la zanahoria, los efectos de los ultrasonidos no aparecieron hasta que la potencia superó un umbral

---

comprendido entre 20 y 30 W. A partir de este umbral, se identificó también una relación lineal entre  $D_e$  ó  $k$  y la potencia aplicada. En este caso la pendiente de estas rectas fue del orden de diez veces menor que para la corteza de limón. Es decir, los efectos de los ultrasonidos fueron más intensos en la corteza de limón (porosidad 0.4) que en un producto de menor porosidad como es la zanahoria (0.04). Por lo tanto, de nuevo se puso de manifiesto la importancia de la materia prima en la influencia de los ultrasonidos en el secado convectivo.

El modelo empírico de Weibull se utilizó como complemento a los modelos difusionales SRE y RE para la modelización de los diferentes tipos de experiencias de secado realizadas en este trabajo. El modelo de Weibull describió de forma adecuada las cinéticas de secado de los diferentes productos, proporcionando porcentajes de varianza explicada similares a los del modelo RE y muy superiores a los del modelo SRE. Además, a partir del análisis de sus parámetros ( $\alpha$  y  $\beta$ ) se obtuvo una información similar a la que proporcionaron los modelos difusivos para evaluar la influencia de los ultrasonidos de potencia en el secado convectivo.

En vistas a un posible uso de los ultrasonidos de potencia en la liofilización a presión atmosférica se abordó esta técnica de secado. La liofilización a presión atmosférica presenta una baja velocidad de secado al utilizar temperaturas por debajo del punto de congelación de los alimentos. La aplicación de ultrasonidos en estas condiciones podría resultar muy interesante, pues aumentaría la velocidad de secado sin incrementar de forma significativa la temperatura del material. Por lo tanto, estos aspectos justificarían el estudio de la aplicación de la tecnología ultrasónica en este proceso. Como paso previo, se consideró oportuno evaluar la influencia de la liofilización a presión atmosférica en los parámetros de calidad de un producto de elevado valor añadido como es el bacalao. Así se realizaron experiencias de secado en lecho móvil de bacalao granulado y cortado en cubos (5 mm) a diferentes temperaturas (-10, -5, 0, 15 y 30 °C) utilizando un secadero provisto de bomba de calor. También se realizaron experiencias combinando temperaturas, es decir, utilizando temperaturas por debajo del punto de congelación (-5 y -10 °C) cuando la humedad es elevada y, a partir de contenidos

de humedad inferiores a 0.4 kg w/kg producto, una temperatura elevada (30 °C). Las cinéticas de secado de los cubos de bacalao se modelizaron con un modelo difusional SRE y con el modelo de Weibull. A partir de los valores de difusividad efectiva identificados se estimaron valores de energía de activación, muy diferentes para las experiencias realizadas a bajas (-10 y -5 °C, 71.1 kJ/mol) y las realizadas a altas temperaturas (15 y 30 °C, 30.7 kJ/mol). Las muestras secadas a temperaturas por debajo del punto de congelación presentaron mejores índices de calidad caracterizados por una mayor luminosidad, menor encogimiento, menor densidad aparente y mayor capacidad de rehidratación que las muestras secadas con aire caliente (15 y 30 °C). Mientras, las secadas a 0 °C presentaron unos parámetros de calidad intermedios. La combinación de temperaturas incrementó de forma apreciable la velocidad de secado respecto a las experiencias de liofilización y no influyó de forma apreciable en la calidad del producto.

La aplicación de ultrasonidos de potencia podría incrementar la velocidad de los procesos de transferencia de materia en condiciones de liofilización a presión atmosférica sin producir un aumento significativo de la temperatura del producto, y por tanto, sin afectar a su calidad. A partir de los resultados obtenidos en este trabajo, se podría esperar un incremento de la difusividad efectiva del 55 % por la aplicación de ultrasonidos de potencia. Este incremento supondría una reducción de 45000 s (12.5 horas) en el tiempo necesario para alcanzar un contenido de humedad de 0.15 kg w/kg producto en las experiencias realizadas a -10 °C.

**ABSTRACT**

Convective drying of foods presents some limitations which make it difficult to apply on specific fields. Among other things, the low drying rate and product quality loss must be considered. Some of these limitations may be overcome combining other technologies, which may be used as additional energy sources during drying. Power ultrasounds are considered as an appropriate technology since they may affect drying without significantly heating the material. This fact may contribute to its application in the drying of heat sensitive materials or in drying processes carried out at low temperatures, such as atmospheric freeze drying.

Power ultrasounds have been applied to affect mass transfer processes in solid-liquid treatments, like meat and cheese brining, the osmotic dehydration of fruits and several extraction processes. Nevertheless, applications on solid-gas systems are much less frequent due to some technical difficulties, which prevent this technology from being fully developed. Among other things, the high impedance mismatch between the application systems and air, which makes the acoustic wave transmission difficult, and the high acoustic energy absorption of the air must be considered. These limitations may be overcome by adequately designing the ultrasonic application system.

The mass transfer process that takes place during convective drying may be influenced by a series of effects associated to power ultrasound application. On one hand, the external resistance to mass transfer may be affected by pressure variations, oscillating velocities and microstreaming at the solid-gas interfaces thus reducing the boundary layer thickness and therefore improving water transfer from solid surface to air medium. On the other hand, internal resistance may be reduced by alternating expansion and compression cycles produced by ultrasound in the material (a phenomenon known as the "sponge effect") and also through some effects on the interfaces of intercellular spaces, or even by cavitation which may contribute to removing the strongest attached moisture to solid matrix.

The main aim of this work was to determine the effect of applying power ultrasound on convective drying processes, establishing the influence of the main process variables.

In order to reach this objective, a new ultrasonic system was designed to attain a good transmission of acoustic energy to the gas medium. The design was carried out by considering the walls of the drying chamber as the device for radiating the acoustic energy, and as a consequence the drying chamber would be the vibrating element transmitting the acoustic energy to the particles. The design was made through modelling, considering a finite element model in 2 dimensions using the ANSYS code. As a result, an ultrasonic system consisting of an aluminium cylinder (external diameter 120 mm, thickness 10 mm and height 310 mm) driven by a piezoelectric composite transducer was developed. The driving transducer consists of an extensional piezoelectric sandwich element together with a mechanical amplifier. The ultrasonic system was characterized before being installed on the convective drier, and for that purpose not only the electric properties were measured using an impedance analyzer but also the response of the system when applying an electric power of 90 W (frequency 21.8 kHz, voltage 60 V, intensity 1.55 A, phase 4° and impedance 329  $\Omega$ ). The acoustic field generated inside the cylinder produced an average sound pressure level of about 154.3 dB when the electrical power applied to the transducer was 75 W. This figure was very close to that estimated from modelling using the finite element method (156.3 dB).

A laboratory scale convective drier was modified to install the different elements of the ultrasonic system. The drier modifications were carried out in such a way as to provide good working conditions for the vibrating cylinder and also to maintain the automatic weighing system on the drier.

Drying kinetics of several foodstuffs were carried out: carrot, apricot, persimmon and lemon peel. Sorption isotherms were obtained from literature except for lemon peel, since no references were found for this product. Thus, the

sorption isotherms of lemon peel were determined at different temperatures (20, 30, 40 and 50 °C) using electric hygrometers.

The GAB model was rated as the best for describing the experimental sorption data when considering the influence of temperature. The isosteric heats of sorption were determined from the Clausius-Clapeyron equation using differential and integral identification methods and also from Riedel equation. The isosteric heats of sorption provided by both methods were very similar.

No significant effect of power ultrasound application (75W, 21.7 kHz) was observed on fluidized bed drying kinetics of carrot cubes (side 8.5 mm) and eights parts of apricots. Experiments were carried out at different temperatures (30, 35, 40, 45, 50, 55 and 60 °C) and air velocities between 10 and 14 m/s. Activation energy figures were similar to others found in the literature for these products.

The influence of air velocity on the acoustic field generated by the ultrasonic system was addressed due to the previous results from fluidized bed drying kinetics. As the air velocity increased, there was a reduction in the average sound pressure level, although, it seems to remain constant from an air velocity figure of about 8 m/s onwards. Therefore, the air velocity increase provided lower acoustic energy levels available for the particles in the drying chamber.

Drying kinetics of different products (carrot, persimmon and lemon peel) and geometries (cubes, cylinders and disks) were carried out at air velocities of between 0.5 and 14 m/s. Air velocity affected the non ultrasonic (SUS) drying kinetics of the different products up to a value of about 5 m/s. This threshold was established from the effective moisture diffusivities ( $D_e$ ) identified with a diffusion model considering external resistance to mass transfer as negligible (SRE model). Power ultrasound application (75 W, 21.7 kHz) only increased the effective diffusivity values identified with the SRE model on the drying kinetics of carrot and persimmon for experiments carried out at air velocities lower than 6 m/s. As a consequence, the influence of power ultrasound was negligible at high air flow rates (low acoustic energy levels). However, power ultrasound application on

lemon peel drying significantly increased ( $p < 0.05$ ) effective diffusivities at all the air velocities considered. A possible explanation of the fact that lemon peel behaves differently compared to carrot and persimmon is its structure. Acoustic effects on lemon peel were stronger, as it is considered to be a more porous product than carrot or persimmon.

Porosity may be considered as one of the most important structural variables for determining the acoustic effectiveness in foodstuffs. High porosity products may be considered more prone to alternating compression and expansion cycles produced by ultrasonic waves, improving water movements in its large intercellular spaces. Small intercellular spaces are also found in low porosity products, that means a high internal resistance to mass transfer. Thus, high acoustic energy levels are required to affect mass transfer in low porosity products.

The influence of porosity may also be explained considering a greater acoustic energy absorption in high porosity products. As a consequence, the internal energy available in the particles would increase, leading to more intense compressions and expansions (sponge effect), which could improve water removal and therefore, reduce internal resistance. Furthermore, the acoustic effects on the solid-gas interfaces of intercellular spaces could increase in high porosity products due to a larger porous net. Indeed, this phenomenon also contributes to reduce internal resistance to mass transfer.

Diffusion models that do not consider the external resistance to mass transfer (SRE) presented a poor fit to the experimental data in experiments carried out at low air velocities but a good fit at high air velocities. Therefore, diffusion models considering external resistance (RE), which differ according to geometry, were applied on experiments carried out at low air velocities. RE models were solved using an implicit finite difference method using the programming language available on Matlab. RE models provided percentages of explained variance higher than 99 % and mean relative errors lower than 10 % in all the cases.

In persimmon drying experiments carried out at air velocities of lower than 6 m/s, power ultrasound application (75 W, 21.7 kHz) significantly increased ( $p < 0.05$ ) the effective moisture diffusivity ( $D_e$ ) and the mass transfer coefficient ( $k$ ) values identified with the RE model. Therefore, both external and internal resistance to mass transfer were significantly affected by power ultrasound application when low air velocities were used.

The influence of air temperature on power ultrasound assisted convective drying was addressed from SUS (without ultrasound) and US (ultrasound, 75 W, 21.7 kHz) drying experiments of carrot cubes (side 8.5 mm) carried out at 1 m/s and at several air temperatures: 30, 40, 50, 60 and 70 °C.  $D_e$  and  $k$  figures identified from US experiments were only significantly ( $p < 0.05$ ) higher than those identified on SUS experiments when air temperature was lower than 60 °C. The influence of power ultrasound application decreased as the air temperature got higher and it was almost negligible at 70 °C. Effective moisture diffusivities identified from US experiments at the different temperatures showed a poor fit when considering an Arrhenius equation, due to the cross effect of temperature and ultrasound application. Figures identified at high temperatures (60 and 70 °C) departed from the tendency shown by  $D_e$  figures identified at low temperatures (30, 40 and 50 °C).

The effect of mass load used in the experiments was also considered. In order to clarify its influence, SUS and US (75 W, 21.7 kHz) drying experiments of carrot cubes (side 8.5 mm) were carried out at several mass load densities: 12, 24, 36, 42, 48, 60, 72, 84, 96, 108 and 120 kg/m<sup>3</sup>, at 1 m/s and at 40 °C. There was a significant ( $p < 0.05$ ) influence of mass load on drying kinetics. The drying rate decreased as the mass load placed in the drying chamber increased. The results provided by the RE model showed that mass load density did not affect  $D_e$ , but was only observed to affect the mass transfer coefficient ( $k$ ). The increase of the number of particles placed on the drying chamber trays may disrupt the air flow around the particles and create channeling. This fact increases external resistance, and therefore contributing to reduce  $k$ .

The influence of power ultrasound was observed in the whole range of mass load density tested increasing both  $D_e$  and  $k$  figures. The effect was not significant ( $p < 0.05$ ) at mass load densities higher than  $90 \text{ kg/m}^3$ . This fact may be explained considering the decrease of the amount of energy per unit mass as the load increases.

An important variable to take into account is the ultrasonic power level applied. Drying experiments of carrot cubes (side 8.5 mm) and lemon peel slabs (thickness 7 mm) were carried out at 1 m/s and 40 °C at different ultrasonic powers: 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 and 90 W. A significant ( $p < 0.05$ ) influence of this variable on the drying kinetics was observed. In the case of lemon peel, a linear correlation was found between  $D_e$  or  $k$  and the ultrasonic power applied, and this relationship was valid for all the range tested. Nevertheless in carrot drying, the ultrasonic effects were negligible below ultrasonic power figures of around 20-30 W. Above this threshold, the linear relationship between  $D_e$  or  $k$  and the power ultrasonic was also observed. Furthermore, the slopes found in the linear relationships were 10 times lower in the case of carrot regarding those found on lemon peel experiments. As a consequence, the ultrasonic effects were more intense on lemon peel (porosity 0.4) than in carrot (porosity 0.04), which is considered a low porosity product. Therefore, the influence of raw material on the ultrasonic effects observed during convective drying is confirmed.

To test if the conclusions reached demonstrated a bias in the model, the empirical model of Weibull was used in a complementary way to SRE and RE diffusion models to describe the different kinds of drying experiments. The Weibull model adequately described the drying kinetics of the different products, providing percentages of explained variance similar to those found by the RE model and much higher than the SRE model at low air velocities. The Weibull parameters ( $\alpha$  and  $\beta$ ) convey similar information about the influence of power ultrasound on convective drying to that obtain through diffusion models.

Atmospheric freeze drying technology was addressed to consider the use of power ultrasound in this process. Atmospheric freeze drying presents low drying

---

rates due to the use of air temperatures below freezing point. Power ultrasound application may be considered interesting in these conditions, since it could increase the drying rate without significantly heating the material. Thus, addressing ultrasonic application in this process may be considered as a matter of relevant research. Before addressing ultrasonic application, the influence of atmospheric freeze drying on the quality parameters of a highly valuable product, like cod fish, was considered. Thus, drying kinetics of granulated and cubic (side 5 mm) samples of cod fish were carried out at different temperatures (-10, -5, 0, 15 and 30 °C) using a heat pump drier. Experiments were also conducted by combining temperatures. Figures below freezing point (-10 or -5 °C) were used until moisture contents of close to 0.4 kg water/kg product, while a high temperature (30 °C) was applied in the last drying stage. Drying kinetics of cod fish cubes were fitted using diffusion (SRE) and Weibull models. Different activation energy figures were assessed from the effective moisture diffusivities identified for experiments carried out below freezing point (-10 and -5 °C, 71.1 kJ/mol) and at high temperatures (15 and 30 °C, 30.7 kJ/mol). Higher quality parameters were found for samples dried below freezing point, these samples presented higher brightness, lower shrinkage, lower bulk density and higher rehydration ability than samples dried using hot air (15 and 30 °C). Samples dried at 0°C, on the other hand, presented intermediate quality parameters. The combination of temperatures (-10/30°C or -5/30 °C) significantly increased the drying rate and provided similar quality parameters in the samples to those dried under atmospheric freeze drying conditions.

Power ultrasound application would increase mass transfer rate in atmospheric freeze drying processes without significantly heating the material, and therefore without affecting product quality parameters. Based on ultrasonic experiments an effective moisture diffusivity increase of about 55 % would be expected by ultrasound application, similar to those obtain on experiments carried out in this work. As a consequence, the drying time to reach a moisture content of 0.15 kg water/kg product would be reduced by 45000 s (12.5 hours) in experiments carried out at -10 °C.



**RESUM**

L'assecatge convectiu d'aliments presenta encara algunes limitacions que en dificulten l'aplicació en camps específics. Entre aquestes es troba la baixa velocitat d'assecatge i la pèrdua de qualitat del producte. Algunes d'aquestes limitacions poden salvar-se amb la introducció de noves tecnologies usades com a fonts addicionals d'energia. Entre d'altres, destaquen els ultrasons de potència, que poden influir en la velocitat d'assecatge sense produir un augment significatiu de la temperatura del material. Això n'afavoreix l'aplicació a l'assecatge de materials sensibles a la calor o en processos d'assecatge realitzats a baixes temperatures, com per exemple la liofilització a pressió atmosfèrica.

Els ultrasons de potència s'han aplicat amb l'objectiu d'influir en la transferència de matèria en sistemes sòlid-líquid, com la saladura de carn i formatge, la deshidratació osmòtica de fruites i diversos processos d'extracció. En canvi, les aplicacions d'ultrasons de potència en sistemes sòlid-gas, com és el cas de l'assecatge convectiu, són menys freqüents a causa d'algunes limitacions que dificulten enormement el desenvolupament d'aquesta tecnologia. Entre d'altres, destaca la diferència d'impedàncies entre els sistemes d'aplicació d'ultrasons i l'aire, que dificulta la transmissió de les ones, i l'elevada absorció d'energia acústica de l'aire. Aquestes limitacions poden superar-se a partir d'un disseny adequat del sistema d'aplicació d'ultrasons.

Hi ha una sèrie d'efectes associats a l'aplicació d'ultrasons de potència que poden influir en els processos de transferència de matèria que tenen lloc durant l'assecatge convectiu. D'una banda, la resistència externa a la transferència de matèria pot ser afectada per les velocitats oscil·lants, els microcorrents i les variacions de pressió que produeixen els ultrasons en les interfícies sòlid-gas. D'altra banda, la resistència interna pot disminuir pels cicles de compressió i descompressió que produeixen els ultrasons en els materials (efecte esponja), i pels efectes en les interfícies dels espais intercel·lulars i, fins i tot, per la cavitació, que pot ajudar a eliminar l'aigua més fortament retinguda.

El principal objectiu d'aquest treball ha sigut determinar l'efecte dels ultrasons de potència en processos d'assecatge convectiu establint la influència de les principals variables del procés.

Per a la consecució d'aquest objectiu es va pretendre dissenyar un nou sistema d'aplicació d'ultrasons que aconseguira una transmissió adequada d'energia ultrasònica al medi. El disseny es va basar en la idea d'aconseguir que foren les mateixes parets de la cambra d'assecatge les encarregades de radiar l'energia ultrasònica, és a dir, que la cambra d'assecatge fóra l'element vibrant i que transmetera l'energia a les partícules que hi havia a l'interior. La construcció del sistema es va realitzar a partir dels càlculs de disseny realitzats en 2 dimensions per elements finits utilitzant el codi ANSYS. Així, es va desenvolupar un transductor consistent en un cilindre d'alumini (120 mm de diàmetre extern, 10 mm de gruix i una longitud de 310 mm) vibrant a flexió, excitat per un vibrador compost per un transductor tipus sandvitx i un amplificador mecànic. Abans del muntatge a l'assecador, el sistema d'aplicació ultrasònic va ser caracteritzat amb un pont d'impedàncies i, a més, subministrant-li una potència elèctrica de 90 W (freqüència 21.8 kHz, voltatge 60 V, intensitat 1.55 A, desfasament  $4^\circ$  i impedància 329  $\Omega$ ). També es va estudiar l'estructura del camp acústic generat a l'interior de la cambra d'assecatge, i es va determinar un valor mitjà de pressió sonora de 154.3 dB quan es va aplicar una potència elèctrica de 75 W. Aquest valor es va aproximar molt al valor predit a partir de la modelització amb elements finits (156.3 dB).

Per a la instal·lació del sistema d'aplicació d'ultrasons de potència es va modificar un assecador convectiu tradicional. En l'adaptació, es van aconseguir tant unes condicions de treball adequades per al sistema d'aplicació d'ultrasons com mantenir el procés de pesada automàtic que hi havia a l'assecador tradicional.

Es van realitzar experiències d'assecatge de diferents productes: carlota, albercoc, caqui i corfa de llima. Les isoterms de sorció d'aquests productes es van obtenir de la bibliografia excepte per al cas de la corfa de llima, ja que no se'n

van trobar referències bibliogràfiques. Per aquest motiu, es van determinar experimentalment les isoterms de sorció a diferents temperatures (20, 30, 40 i 50°C) de la corfa de llima, utilitzant higròmetres elèctrics.

El model de GAB fou el que millor va descriure les dades de sorció experimentals de la corfa de llima. D'altra banda, es va identificar la influència de la temperatura en la isoterma. La calor isostèrica de sorció va ser determinada a partir de l'equació de Clausius-Clapeyron, mitjançant els mètodes de càlcul diferencial i integral i també usant l'equació de Riedel. Els valors estimats de la calor isostèrica amb els diferents mètodes van ser semblants.

L'aplicació d'ultrasons de potència no va produir cap influència en les cinètiques d'assecatge en lilit fluïditzat de cubs de carlota (8.5 mm de costat) i vuitens d'albercoc realitzades a diferents temperatures (30, 35, 40, 45, 50, 55 i 60°C) i velocitats de l'aire entre 10 i 14 m/s. Els valors d'energia d'activació obtinguts per a aquests productes van ser semblants a d'altres que es mostren en la bibliografia i no es van trobar diferències significatives entre els obtinguts per a les experiències amb l'aplicació d'ultrasons de potència (US, 75 W, 21.7 kHz) i sense aquesta aplicació (SUS).

Atesos aquests resultats i a fi d'establir la causa per la qual no es trobaven diferències amb l'aplicació d'ultrasons es va avaluar la influència de la velocitat de l'aire en el camp acústic generat a l'interior de la cambra d'assecatge. Així, es va identificar un descens del nivell mitjà de pressió sonora amb l'augment de la velocitat de l'aire. A partir de 8 m/s aquest valor es va mantenir constant. Per tant, l'augment de la velocitat de l'aire va suposar un descens de l'energia acústica disponible per a les partícules.

D'altra banda, es van realitzar experiències d'assecatge amb diferents productes (carlota, caqui i corfa de llima) i geometries (cubs, cilindres i discos) a velocitats de l'aire entre 0.5 i 14 m/s. La velocitat de l'aire va influir en les cinètiques SUS dels diversos productes fins a una velocitat de l'aire pròxima a 5 m/s. Aquest valor es va establir a partir dels valors de difusivitat efectiva

identificats amb un model difusional sense considerar la resistència externa a la transferència de matèria (SRE). L'aplicació d'ultrasons de potència (75 W, 21.7 kHz) va augmentar els valors de difusivitat efectiva ( $D_e$ ) identificats amb el model SRE en l'assecatge de carlota i caqui únicament per a les experiències realitzades a baixes velocitats de l'aire (< 6 m/s). És a dir, a altes velocitats de l'aire i, per tant, menors nivells d'energia acústica, la influència dels ultrasons en la cinètica d'assecatge d'aquests productes va ser negligible. No obstant això, en les experiències d'assecatge de corfa de llima, l'aplicació d'ultrasons de potència va augmentar de forma significativa ( $p < 0.05$ ) els valors de difusivitat efectiva tant a baixes com a altes velocitats de l'aire. La major sensibilitat de la corfa de llima als efectes dels ultrasons possiblement ve determinada per l'estructura que presenta.

Una de les propietats estructurals que pot tenir major importància en els efectes dels ultrasons és la porositat dels materials. Els productes de major porositat poden ser més sensibles als cicles de compressió i descompressió produïts per les ones ultrasòniques, en facilitar el moviment de l'aigua dins dels grans espais intercel·lulars. En productes de baixa porositat, els espais intercel·lulars són de menors dimensions i, per tant, presenten una major resistència al moviment de l'aigua, de manera que es necessiten majors nivells d'energia acústica perquè aquesta resistència s'hi veja afectada.

La influència de la porositat també pot explicar-se pel fet que, en els productes més porosos, l'absorció d'energia acústica pel material seria major. D'aquesta manera, augmentaria l'energia disponible a l'interior del material i es produirien compressions i descompressions més intenses (efecte esponja) que afavoririen l'eixida de l'aigua i, per tant, la disminució de la resistència interna. De la mateixa manera, els efectes dels ultrasons en les interfícies sòlid-gas dels materials porosos serien més intenses, en presentar una major xarxa interna d'espais intercel·lulars, la qual cosa també reduiria la resistència interna a la transferència de matèria. En aquest sentit, es comprova que la corfa de llima, pel fet de presentar una major porositat que la carlota i el caqui, és més sensible a l'efecte dels ultrasons.

Els models difusionals en què no es va considerar la resistència externa a la transferència de matèria (SRE) no van ajustar de forma adequada les experiències d'assecatge realitzades a velocitats de l'aire baixes. És per això que es van plantejar altres models difusionals, en funció de la geometria de les partícules, i considerant la resistència externa a la transferència de matèria (model RE). Aquests models es van resoldre mitjançant un mètode implícit de diferències finites utilitzant el llenguatge de programació disponible en Matlab. Els models RE van proporcionar percentatges de variància explicada superiors al 99 % i errors mitjans relatius inferiors al 10 % en tots els casos.

Els valors de difusivitat efectiva ( $D_e$ ) i el coeficient de transferència de matèria ( $k$ ) identificats amb el model RE en l'assecatge de caqui van ser significativament ( $p < 0.05$ ) més elevats en les experiències US (75 W, 21.7 kHz) realitzades a velocitats de l'aire inferiors a 6 m/s que en les experiències SUS a la mateixa velocitat. Per tant, quan es van utilitzar velocitats de l'aire baixes, l'aplicació d'ultrasons de potència va influir de forma significativa tant en la resistència interna a la transferència de matèria com en l'externa.

La influència de la temperatura de l'aire en l'assecatge acústic va ser avaluada a partir d'experiències SUS i US (75 W, 21.7 kHz) d'assecatge de cubs de carlota (8.5 mm de costat) realitzades a 30, 40, 50, 60 i 70°C i 1 m/s. L'aplicació d'ultrasons de potència va augmentar de forma significativa ( $p < 0.05$ ) els valors de  $D_e$  i  $k$  per a les experiències realitzades a temperatures inferiors a 60°C. A mesura que la temperatura va augmentar, la influència dels ultrasons va disminuir, fins a desaparèixer en les experiències de 70°C. Els valors de difusivitat efectiva identificats en les experiències US no es van ajustar bé a l'equació d'Arrhenius. Els valors de difusivitat efectiva identificats a altes temperatures (60-70°C) no van seguir la relació lineal mostrada pels valors obtinguts a baixes temperatures (30, 40 i 50°C).

Un altre dels paràmetres avaluats va ser la densitat de càrrega massica. Per aquest motiu, es van realitzar experiències SUS i US (75 W, 21.7 kHz) d'assecatge de cubs de carlota (8.5 mm de costat) a 11 nivells diferents de densitats de

càrrega: 12, 24, 36, 42, 48, 60, 72, 84, 96, 108 i 120 kg/m<sup>3</sup> (1 m/s i 40°C). La densitat de càrrega va influir de forma significativa ( $p < 0.05$ ) en la cinètica del procés. Així, la velocitat d'assecatge va disminuir a mesura que va augmentar la càrrega de partícules a la cambra d'assecatge. A partir de les modelitzacions realitzades amb el model RE, es va poder observar que la densitat de càrrega no va influir en la  $D_e$ , però sí en el coeficient de transferència de matèria ( $k$ ). L'increment de partícules a les safates de la cambra d'assecatge va dificultar el flux d'aire al voltant de les partícules, va incrementar la resistència externa  $i$ , per tant, va fer disminuir  $k$ .

L'aplicació d'ultrasons de potència va augmentar de forma significativa ( $p < 0.05$ ) tant  $k$  com  $D_e$  en tot el rang de densitats de càrrega avaluat, encara que les diferències van deixar de ser estadísticament significatives ( $p < 0.05$ ) a densitats de càrrega superiors a 90 kg/m<sup>3</sup>. Aquest fet pot ser conseqüència de la disminució de la quantitat d'energia ultrasònica que arriba a cada partícula per l'augment de la massa present a la cambra d'assecatge.

L'últim dels paràmetres avaluats per a determinar quina influència tenen en l'assecatge convectiu assistit per ultrasons va ser el nivell de potència acústica aplicat. Es van realitzar experiències d'assecatge de cubs de carlota (8.5 mm de costat) i làmines de corfa de llima (7 mm de gruix) a 40°C i 1 m/s variant el nivell de potència ultrasònica aplicat: 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 i 90 W. A partir d'aquestes cinètiques es va trobar una influència significativa ( $p < 0.05$ ) del nivell de potència aplicat en l'assecatge d'aquests productes. Així, en el cas de la corfa de llima es va establir una relació lineal entre  $D_e$  i  $k$  i la potència ultrasònica aplicada, vàlida per a tot el rang avaluat. No obstant això, en el cas de la carlota, els efectes dels ultrasons no van aparèixer fins que la potència va superar un valor comprès entre 20 i 30 W. A partir d'aquest valor, es va identificar també una relació lineal entre  $D_e$  o  $k$  i la potència aplicada. En aquest cas, el pendent de les dues rectes va ser prop de deu vegades menor que per a la corfa de llima. És a dir, els efectes dels ultrasons van ser més intensos en la corfa de llima (porositat 0.4) que en un producte de menor porositat com és la carlota (porositat 0.04). Per tant, de nou es

va posar de manifest la importància de la matèria primera en la influència dels ultrasons en l'assecatge convectiu.

El model empíric de Weibull es va utilitzar com a complement dels models difusionals SRE i RE per a la modelització dels diferents tipus d'experiències d'assecatge realitzades en aquest treball. El model de Weibull va descriure de forma adequada les cinètiques d'assecatge dels diferents productes, i va proporcionar percentatges de variància explicada semblants als del model RE i molt superiors als del model SRE. A més, a partir de l'anàlisi dels seus paràmetres ( $\alpha$  i  $\beta$ ) es va obtenir una informació semblant a la que van proporcionar els models difusius per a avaluar la influència dels ultrasons de potència en l'assecatge convectiu.

Pensant en un possible ús dels ultrasons de potència en la liofilització a pressió atmosfèrica es va abordar aquesta tècnica d'assecatge. La liofilització a pressió atmosfèrica presenta una baixa velocitat d'assecatge perquè s'utilitzen temperatures per sota del punt de congelació dels aliments. L'aplicació d'ultrasons en aquestes condicions podria resultar molt interessant, perquè faria augmentar la velocitat d'assecatge sense incrementar de forma significativa la temperatura del material. Per tant, aquests aspectes justificarien l'estudi de l'aplicació de la tecnologia ultrasònica en aquest procés. Com a pas previ, es va considerar oportú avaluar la influència de la liofilització a pressió atmosfèrica en els paràmetres de qualitat d'un producte de valor afegit elevat, com és l'abadejo. Així, es van realitzar experiències d'assecatge en llit mòbil d'abadejo granulat i tallat en cubs (5 mm) a diferents temperatures (-10, -5, 0, 15 i 30°C) utilitzant un assecador proveït de bomba de calor. També es van realitzar experiències combinant temperatures, és a dir, utilitzant temperatures per sota del punt de congelació (-5 i -10°C) quan la humitat és elevada, i, a partir de continguts d'humitat inferiors a 0.4 kg w/kg producte, una temperatura elevada (30°C). Les cinètiques d'assecatge dels cubs d'abadejo es van modelitzar amb un model difusional SRE i amb el model de Weibull. A partir dels valors de difusivitat efectiva identificats es van estimar valors d'energia d'activació, molt diferents per a les experiències realitzades a baixes

temperatures (-10 i -5°C, 71.1 kJ/mol) i per a les realitzades a temperatures elevades (15 i 30°C, 30.7 kJ/mol). Les mostres assecades a temperatures per sota del punt de congelació van presentar uns millors índexs de qualitat, caracteritzats per una major lluminositat, un menor encongiment, una menor densitat aparent i una capacitat de rehidratació major que les mostres assecades amb aire calent (15 i 30°C), mentre que les assecades a 0°C van presentar uns paràmetres de qualitat intermedis. La combinació de temperatures va incrementar de forma apreciable la velocitat d'assecatge respecte a les experiències de liofilització i no va influir de forma significativa en la qualitat del producte.

L'aplicació d'ultrasons de potència incrementaria la velocitat dels processos de transferència de matèria en condicions de liofilització a pressió atmosfèrica sense produir un augment significatiu de la temperatura del producte, i per tant, sense afectar-ne la qualitat. A partir dels resultats obtinguts en aquest treball, caldria esperar un increment de la difusivitat efectiva del 55 % per l'aplicació d'ultrasons de potència. Aquest increment repercutiria en una reducció de 45000 s (12.5 hores) en el temps necessari per a aconseguir un contingut d'humitat de 0.15 kg w/kg producte en les experiències realitzades a -10°C.

## **1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1. SECADO CONVECTIVO**

La deshidratación constituye una etapa fundamental en el procesado de muchos alimentos. La disminución del contenido de agua reduce la susceptibilidad al deterioro de los mismos convirtiéndolos en productos más estables. Por otra parte, los procesos de deshidratación se pueden considerar también como etapas previas y necesarias en el procesado de algunos alimentos. Por ejemplo, la reducción del contenido de agua de la materia prima resulta esencial antes de ciertos procesos de extracción (Mulet et al., 2005). Otra de las ventajas de la deshidratación es la reducción del volumen de las muestras, disminuyendo los costes de transporte, almacenamiento y también de deposición de residuos alimentarios (Hasatani et al., 2001).

En el diseño de un proceso de deshidratación, principalmente hay que tener en cuenta dos variables (Lewicki, 2006). Por un lado, los atributos de calidad esperados para ese producto y, por otra parte, la manera en que será usado el producto seco. Ambos parámetros están interrelacionados ya que en muchas ocasiones la forma en que el producto será usado definirá sus atributos de calidad.

Otro de los aspectos más importantes que hay que tener en cuenta en los procesos de deshidratación son las consideraciones medioambientales (Achanta y Okos, 1996). Persiguiendo el objetivo de reducción del impacto medioambiental de los procesos de deshidratación, tanto la utilización de pretratamientos como de fuentes adicionales de energía constituyen alternativas interesantes para aumentar la velocidad del proceso sin incrementar la carga medioambiental del mismo (Mulet et al., 2003a; Lewicki y Michaluk, 2004; Walde et al., 2006). Obviamente, estas alternativas también deben aplicarse teniendo en cuenta su efecto sobre los parámetros de calidad de los productos deshidratados.

La eliminación del agua de los alimentos puede realizarse bien por métodos mecánicos (prensado u ósmosis inversa), o bien por métodos físico-químicos (aire caliente, liofilización, atomización, deshidratación osmótica, microondas,

radiofrecuencias, infrarrojos, ultrasonidos de potencia, CO<sub>2</sub> supercrítico y despresurización instantánea controlada) (Vega-Mercado et al., 2001; Chou y Chua, 2001; Plaza et al., 2003).

### **1.1.1. Generalidades**

El secado convectivo, o secado por aire, es un método de deshidratación utilizado desde la antigüedad, que en la actualidad se sigue utilizando y mejorando. Consiste en la evaporación del agua del producto usando una corriente de aire o de vapor de agua sobrecalentado, de las cuáles, se transfiere la energía al producto para la evaporación del agua.

Durante el secado convectivo tienen lugar dos procesos simultáneamente (Mujumdar y Menon, 1995):

1. Transferencia de energía desde el aire ambiente al producto que permita la evaporación del agua en la superficie.
2. Transferencia del agua desde el interior del sólido hasta su superficie para su posterior evaporación.

La velocidad global del proceso de secado estará determinada por la velocidad respectiva de estos dos procesos. La eliminación del agua como vapor de la superficie del material (proceso 1) depende de las condiciones de temperatura, humedad relativa y velocidad de flujo del aire de secado, además de la superficie expuesta del sólido y de la presión. Mientras, que el movimiento del agua en el interior del sólido es función de la naturaleza del sólido, de la temperatura y de su contenido de humedad. Por lo tanto, la transferencia de agua en el proceso de secado puede estar gobernada por una resistencia localizada en la fase externa o en la fase interna. Cualquiera de estas resistencias puede definir la velocidad del proceso de secado por sí sola, aunque también el proceso puede estar simultáneamente influenciado por ambas resistencias (Mulet, 1994).

### 1.1.1.1. Etapas de secado

Durante el secado convectivo de productos alimentarios se pueden distinguir tres periodos (Chirife, 1979; Sanjuán et al., 2003) (Figura 1.1.1). La clasificación se realiza en función de la variación de la velocidad de secado (Figura 1.1.1).

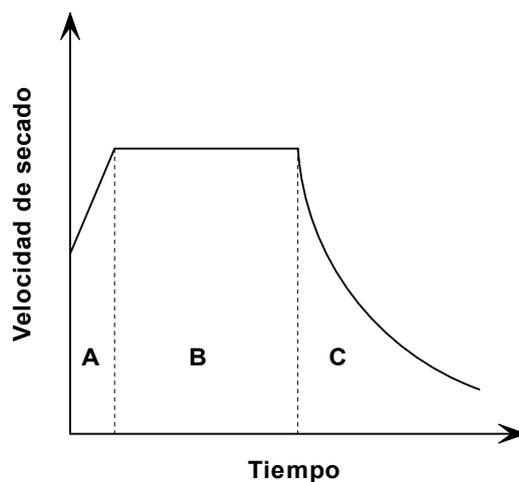


Figura 1.1.1. Curva de secado típica.

**Periodo de velocidad de secado creciente o de inducción (A).** Durante este periodo el producto se calienta lo que conlleva un aumento de la temperatura de la interfase y, por lo tanto, un incremento de la velocidad de evaporación del agua de la superficie del producto. Se puede considerar este periodo como de adaptación del producto a las condiciones de operación (Blasco, 2003).

**Periodo de velocidad de secado constante (B).** Durante este periodo, el movimiento de humedad dentro del sólido es lo bastante rápido como para mantener saturada la superficie. La velocidad de secado estará controlada por la evaporación del agua y su transferencia desde la superficie saturada del material hasta el medio que lo rodea. La transferencia del agua se realizará por difusión a través de la interfase sólido/aire. El mecanismo de pérdida de agua es independiente de la naturaleza del producto y equivale a la evaporación del agua desde una superficie libre. La resistencia a la transferencia de calor o materia está

localizada en la fase fluida. La velocidad del proceso será constante si las condiciones de secado permanecen constantes.

El periodo de velocidad de secado constante se prolonga hasta que el contenido en humedad del sólido desciende por debajo de un valor denominado humedad crítica. En la mayoría de los alimentos, los valores de humedad crítica están muy próximos a los valores del contenido de humedad inicial, de manera que el periodo de velocidad de secado constante en alimentos es muy corto y en muchas ocasiones inexistente (Mujumdar y Devahastin, 2000).

**Periodo de velocidad de secado decreciente (C).** La velocidad de secado empieza a disminuir una vez que la superficie del sólido deja de estar saturada, es decir, aparecen zonas secas. La velocidad de secado transcurrirá a la misma velocidad que en el periodo de velocidad constante en las zonas saturadas y disminuirá en las zonas secas, con lo que la velocidad de secado global disminuirá. A medida que transcurre el proceso de secado, la fracción de superficie saturada disminuye, llegando un momento que toda la superficie del sólido está seca. Durante esta etapa la influencia de las propiedades de la fase externa en la velocidad de secado va disminuyendo, de manera que la importancia del movimiento del agua en el interior del sólido como factor limitante del proceso va en aumento.

#### **1.1.1.2. Mecanismos de transferencia de materia**

Diferentes teorías han sido utilizadas para describir el movimiento del agua en el interior de los sólidos durante el secado, entre las más importantes se encuentran (Chirife, 1979; Waanamen et al., 1993):

1. *Flujo capilar.* Es un mecanismo de transporte que ocurre en sólidos muy húmedos, como la carne, donde los capilares se encuentran llenos de agua. Las fuerzas capilares determinan el movimiento del agua en estado líquido en el interior de los poros. Se considera el mecanismo responsable del

transporte del agua a la superficie saturada que tiene lugar en la etapa de velocidad de secado constante (Mujumdar y Menon, 1995).

2. *Difusión del líquido en los poros.* El agua puede difundir en el interior de los capilares rellenos de agua y de los poros. Este tipo de difusión, se denomina habitualmente “difusión ordinaria” y se produce cuando el diámetro del poro es mucho mayor que el paso libre de las moléculas que difunden.

3. *Difusión superficial.* La difusión superficial es la difusión del agua a lo largo de la superficie de las paredes de los poros y de los capilares.

4. *Flujo hidráulico en los poros.* Este flujo aparece cuando hay un gradiente de presión en los poros y su dirección es hacia donde la presión sea menor.

Generalmente, en un proceso de transferencia de materia no se da únicamente uno de estos mecanismos. El flujo total es consecuencia de la combinación de los diferentes mecanismos. Además, el mecanismo controlante puede variar a lo largo de un proceso.

### **1.1.2. Isotermas de sorción. Relación Humedad-Actividad de agua**

#### **1.1.2.1. Concepto de actividad de agua**

El agua es el componente principal de la mayoría de los alimentos. Muchos de los fenómenos físico-químicos y microbiológicos que se producen en los alimentos están controlados por su grado de disponibilidad (MacCarthy, 1986). La manera de determinar el grado de disponibilidad del agua es a través de la medida de la actividad del agua (Rockland y Beuchat, 1987).

Se define la actividad de cualquier componente químico (i) como el cociente entre su fugacidad en estado gaseoso ( $f_i$ ) y su fugacidad de referencia ( $f_i^0$ ) (Ec. 1.1.1).

$$a_i = \frac{f_i}{f_i^0} \quad (\text{Ec. 1.1.1})$$

La fugacidad de un compuesto se aproxima a su presión cuando ésta es cercana a cero, ya que su comportamiento se aproxima al de los gases ideales. Por lo tanto, la actividad de agua puede expresarse como la relación entre la presión de vapor en la superficie del sólido y la presión de vapor del agua pura a la temperatura del sólido (Rosselló, 1986).

$$a_w = \frac{P_v}{P_v^0} \quad (\text{Ec. 1.1.2})$$

Cuando un alimento está en equilibrio con el ambiente que le rodea, tanto su temperatura como la presión de vapor en su superficie coinciden respectivamente con las del ambiente. Así, en el equilibrio la actividad de agua del alimento es igual a la humedad relativa de equilibrio del sistema alimento-aire.

A medida que aumenta la actividad de agua en un producto aumenta su grado de disponibilidad para reacciones químicas de deterioro o crecimiento de microorganismos. El hombre desde la antigüedad ha utilizado técnicas capaces de reducir la actividad de agua de los alimentos para aumentar su estabilidad de cara a su almacenamiento. Entre otras, destacan el salado, el ahumado, la congelación y la preparación de confituras. Todas las técnicas tienen en común la reducción de la actividad de agua del alimento, y por tanto de su grado de disponibilidad. Estas técnicas de conservación se han utilizado mucho tiempo de forma intuitiva sin conocer de forma explícita el concepto de actividad de agua. En la Figura 1.1.2. se aprecia como la velocidad de diferentes procesos degradativos disminuye a medida que decrece la actividad de agua del producto. Por ejemplo, por debajo de una actividad de agua de 0.7 no habrá crecimiento de mohos, levaduras y bacterias.

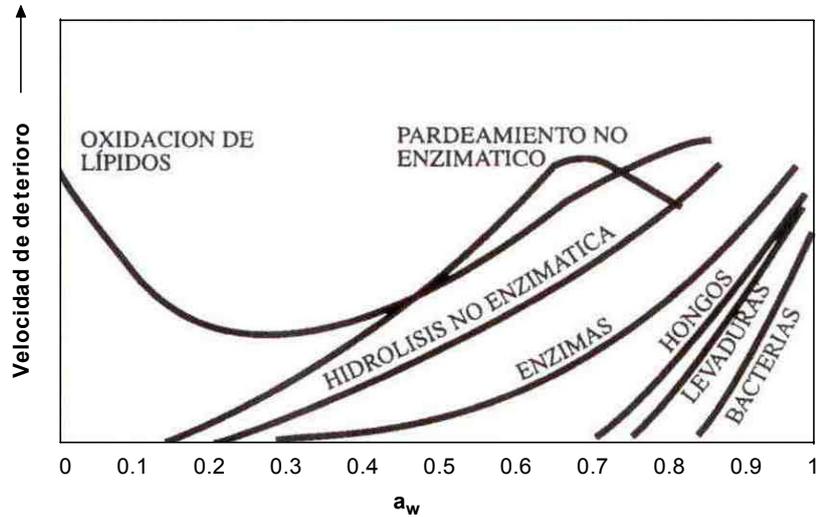


Figura 1.1.2. Influencia de la  $a_w$  en reacciones de deterioro de alimentos (Martínez-Navarrete et al., 2000).

### 1.1.2.2. Isotermas de sorción

En todos los alimentos existe una relación característica a una temperatura determinada, entre el contenido de humedad del producto y su actividad de agua cuando se alcanza el equilibrio termodinámico en el sistema (Mulet et al., 2002a). La representación gráfica de esos pares de datos en un determinado intervalo de actividad de agua y humedad se denomina isoterma de equilibrio o de sorción. Las isotermas de sorción presentan generalmente una forma sigmoideal (Brunauer et al., 1938). El conocimiento de la isoterma de sorción es muy importante para muchos de los procesos de la industria agroalimentaria como:

*Secado.* Los datos de sorción son útiles para el control de los procesos de secado. A partir de éstos, se puede conocer la humedad máxima que debe tener el producto seco para que sea estable en su almacenamiento. También se utiliza para determinar la humedad del producto en equilibrio con el aire de secado, que representa una información muy útil para la

modelización del proceso. Por último, a partir del análisis de las isotermas se puede estimar la energía requerida para el secado.

*Almacenamiento.* A partir de las isotermas de sorción se pueden determinar las condiciones óptimas de almacenamiento (humedad relativa y temperatura) que aseguren la estabilidad del producto.

*Mezclado de productos.* Hay que tener en cuenta que tras el envasado de un producto compuesto de diferentes componentes individuales, se alcanzará un equilibrio en el sistema, de manera que coincida la humedad relativa del aire con las actividades de agua de los diferentes componentes. Para alcanzar este equilibrio, unos componentes del producto pueden ganar agua y otros perderla.

*Envasado.* La elección de un envase adecuado es importante, entre otros motivos, para proteger al alimento frente a variaciones en el contenido de humedad que puedan producir un deterioro del mismo. El proceso de cálculo de la permeabilidad del vapor de agua en un material envasado se basa en la primera ley de difusión de Fick.

*Entorno.* A partir de las isotermas es posible conocer cuál sería un entorno adecuado de los alimentos, es decir, las características ambientales óptimas de las plantas industriales para cada alimento (Mathlouthi, 2001).

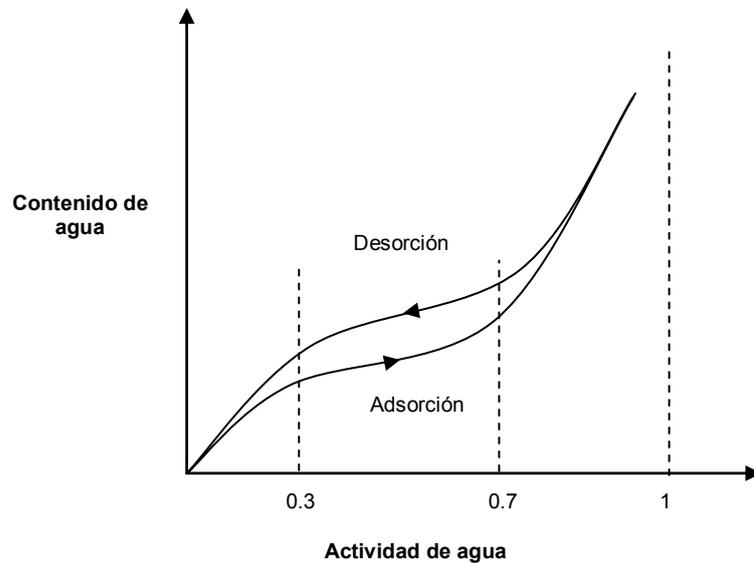
En función del modo de obtención las isotermas de sorción pueden clasificarse en dos grupos (Labuza, 1975).

*Isotermas de adsorción.* Se obtienen colocando materiales secos en atmósferas de humedad relativa superior a su actividad de agua para que haya una adsorción de agua. El equilibrio se alcanza cuando el peso del producto permanece constante.

*Isoterma de desorción.* En este caso, se parte de sólidos húmedos que pierden agua al colocarlos en atmósferas de humedad relativa inferior a su actividad de agua (Leung, 1986). De igual manera que en el caso anterior la

condición de equilibrio viene determinada por un peso constante de la muestra.

Generalmente, las isothermas de adsorción y desorción no suelen coincidir. Normalmente, la isoterma de adsorción se sitúa por debajo de la de desorción formando un lóbulo de histéresis (Figura 1.1.3.) que disminuye al aumentar la temperatura a la cuál se ha determinado la isoterma. Diversas teorías han tratado de explicar esta diferencia. La mayor parte de ellas coinciden en que el proceso de sorción presenta una cierta irreversibilidad, representando la isoterma de desorción un equilibrio metaestable (Rao, 1941; Everett, 1967).



**Figura 1.1.3. Isothermas de adsorción y desorción.**

El uso de uno u otro tipo de isoterma se determina en la práctica según los objetivos pretendidos. Así, por ejemplo, en procesos de secado es más útil la isoterma de desorción, mientras que la isoterma de adsorción suele utilizarse más en procesos de rehidratación o almacenamiento.

En general se asume que las isothermas representan las interacciones agua-sustrato y suelen identificarse tres zonas:

- Zona de actividades de agua bajas. Las moléculas de agua están fuertemente retenidas y su movilidad es prácticamente nula. Corresponde a la adsorción de agua en la monocapa de moléculas a los sitios activos. Representa una fracción de agua que es muy difícil de eliminar del sólido y que no está disponible para facilitar las reacciones.
- Zona de actividades de agua comprendidas entre 0.3 y 0.7. Corresponde a la adsorción de sucesivas capas de moléculas de agua (multicapa) encima de la monocapa. Las fuerzas de interacción entre las moléculas de agua y el sólido en la multicapa es intermedia entre las existentes en la monocapa y el agua libre.
- Zona de actividades de agua altas. A medida que aumenta el contenido de humedad disminuye la interacción de las moléculas con la matriz sólida. Así, el agua presente se puede considerar como prácticamente libre. En esta zona la pendiente de la isoterma es muy grande ya que los cambios del contenido de humedad no influyen prácticamente en la actividad de agua. Corresponde a la condensación de agua en los poros del material y a la disolución del material soluble presente.

El establecimiento experimental de las isotermas de sorción se realiza obteniendo pares de datos de actividad de agua y de humedad de equilibrio. La determinación se debe realizar a la misma temperatura y evitar los gradientes de humedad en el producto.

Para la determinación experimental de las isotermas de sorción se pueden emplear diferentes métodos. Uno de los más antiguos y muy utilizados, es el método gravimétrico, consistente en la introducción del producto en recipientes aislados con disoluciones saturadas de ciertas sales que garantizan una determinada humedad relativa. Cuando se alcance el equilibrio la actividad de agua del producto coincidirá con la humedad relativa del ambiente.

Posteriormente, se deberá analizar el contenido de humedad final del producto. Los principales inconvenientes que tiene este método es el largo periodo de tiempo necesario para alcanzar el equilibrio y que nunca se sabe con total seguridad si se ha alcanzado el mismo. Otra posibilidad para obtener la isoterma de sorción es la utilización de higrómetros de punto de rocío o eléctricos. Estos equipos determinan de forma experimental la actividad de agua del alimento coincidente con la humedad relativa de la cámara de medida donde se introducen las muestras. La relación Volumen de cámara/Volumen de muestra es muy pequeña de modo que la humedad relativa inicial del ambiente no distorsione la medida experimental. El principal inconveniente de la determinación de las isotermas con estos equipos, es que nunca puede asegurarse que se está obteniendo una isoterma de desorción o de adsorción.

Cuando se aborda el estudio del proceso de secado de un producto se hace totalmente imprescindible la determinación experimental de la isoterma de sorción, de cara a, entre otros aspectos, obtener la información necesaria para la posterior modelización de las cinéticas de secado.

### ***1.1.2.3. Modelización de las isotermas de sorción***

La modelización de las isotermas de sorción es un apartado necesario para la modelización posterior del proceso de secado. Debido a la complejidad de los alimentos, no hay ningún modelo que ajuste bien en todos los casos (Isse et al., 1993; McMinn y Magee, 1997). Por lo tanto, la aplicación de modelos está limitada por el hecho de que los alimentos son productos heterogéneos formados por componentes de diferentes propiedades higroscópicas.

En la bibliografía aparecen numerosas ecuaciones para modelizar las isotermas de sorción de los alimentos, modelos que difieren en la base teórica que presentan, así como en el número de parámetros de ajuste. Por lo tanto, cuando se aborda la modelización de un producto no estudiado previamente resulta interesante evaluar la capacidad de ajuste de diferentes modelos con el objetivo

de disponer para la optimización de distintas ecuaciones con diferente grado de aplicabilidad. Algunos de los modelos más utilizados en la bibliografía son: GAB (Guggenheim, 1966; Anderson, 1946; De Boer, 1953), Oswin (Oswin, 1983), Henderson (Henderson, 1952), Halsey (Halsey, 1948) y Ratti (Ratti et al., 1989).

### **GAB**

El modelo de GAB (Ec. 1.1.3) está basado en la teoría de sorción, según la cuál una molécula de adsorbato no puede moverse libremente por la superficie del adsorbente, regular y uniforme, ni puede presentar interacciones laterales con otras moléculas adyacentes (Coulson y Richardson, 1979; Leung, 1986). La ecuación de GAB ha sido, y es, aplicada a numerosos alimentos en un amplio intervalo de actividades de agua (Leung, 1986; Kaymak-Ertekin y Saltanoglu, 2001; Mulet et al., 2002a; Bellagha et al., 2005, Lin et al., 2005).

$$W = W_m \frac{C_G K_G a_w}{(1 - K_G a_w)(1 + (C_G - 1)K_G a_w)} \quad (\text{Ec. 1.1.3})$$

Los tres parámetros del modelo ( $W_m$ ,  $C_G$  y  $K_G$ ) tienen un significado físico.  $W_m$  representa el contenido de humedad de la monocapa, mientras que  $C$  y  $K$  están relacionados con el calor de sorción de las moléculas de agua en la monocapa y en la multicapa. La ecuación de GAB es uno de los modelos que mejor representa los datos experimentales de sorción, siendo recomendada por el proyecto europeo COST-90 (Bizot, 1983). Los parámetros  $C$  y  $K$  pueden relacionarse con la temperatura (Ec. 1.1.4 y 1.1.5), de forma que la ecuación resultante pasa a tener 5 parámetros ( $W_m$ ,  $C_0$ ,  $\Delta H_C$ ,  $K_0$  y  $\Delta H_K$ ) en vez de 3, y a depender de 2 variables, temperatura y actividad de agua.

$$C_G = C_0 \exp\left(\frac{\Delta H_C}{RT}\right) \quad (\text{Ec. 1.1.4})$$

$$K_G = K_0 \exp\left(\frac{\Delta H_K}{RT}\right) \quad (\text{Ec. 1.1.5})$$

Siendo  $\Delta H_C = H_m - H_n$  y  $\Delta H_K = L_r - H_n$  donde  $H_m$  y  $H_n$  representan el calor de sorción en la monocapa y en la multicapa respectivamente, mientras  $L_r$  es el calor latente de vaporización del agua pura.

*Oswin modificado*

El modelo de Oswin (Ec. 1.1.6) fue desarrollado a través de una expansión en series matemáticas de curvas sigmoidales. Al igual que el modelo de GAB, presenta la humedad como variable dependiente de la temperatura y de la actividad de agua (Lim et al., 1995; Sun, 1999).

$$W = (A_{OS} + B_{OS} T) \left( \frac{a_w}{1 - a_w} \right)^{C_{OS}} \quad (\text{Ec. 1.1.6})$$

$A_{OS}$ ,  $B_{OS}$  y  $C_{OS}$  son los tres parámetros de ajuste del modelo de Oswin.

*Henderson modificado*

El modelo de Henderson se ha utilizado en multitud de ocasiones para la descripción de isotermas de sorción de productos higroscópicos (Ec. 1.1.7).

$$W = \left[ -\frac{1}{A_H (T + C_H)} \ln(1 - a_w) \right]^{1/B_H} \quad (\text{Ec. 1.1.7})$$

$A_H$ ,  $B_H$  y  $C_H$  son los tres parámetros de ajustes del modelo de Henderson.

*Halsey modificado*

El modelo de Halsey fue desarrollado a partir de la teoría de la condensación de las moléculas de agua en la multicapa (Leung, 1986) (Ec. 1.1.8).

$$W = \left[ -\frac{\exp(C_{Ha} + B_{Ha} T)}{\ln(a_w)} \right]^{1/A_{Ha}} \quad (\text{Ec. 1.1.8})$$

$A_{Ha}$ ,  $B_{Ha}$  y  $C_{Ha}$  son los tres parámetros de ajustes del modelo de Halsey.

*Ratti*

En el modelo de Ratti (Khalloufi et al., 2000) la actividad de agua se presenta como una función de la humedad, a diferencia de lo que ocurre en el resto de modelos en los que generalmente se muestra la humedad como una función de la actividad de agua.

$$\ln(a_w) = -k_1 W^{k_2} + k_3 e^{(-k_4 W) \ln(P_s)} W^{k_5} \quad (\text{Ec. 1.1.9})$$

$k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$  y  $k_5$  son los cinco parámetros de ajuste del modelo de Ratti. La influencia de la temperatura en el modelo se establece a partir de la presión de vapor de saturación ( $P_s$ ), que puede estimarse a partir de la ecuación propuesta por la American Society of Agricultural Engineers (ASAE, 2000).

**1.1.2.4. Calor isostérico de sorción**

El calor isostérico de sorción es una medida de la energía de enlace entre las moléculas de agua y la superficie a la que están adsorbidas. Por lo tanto, representa la energía requerida para eliminar el agua de la matriz sólida. El calor isostérico neto de sorción se considera como la diferencia entre el calor isostérico y el calor de vaporización del agua pura (Ec. 1.1.10). La energía necesaria para eliminar una determinada cantidad de agua aumentará a medida que transcurre el proceso de deshidratación del alimento, por lo tanto el calor isostérico será una función dependiente de la humedad.

$$q_{sn} = Q_s - L_r \quad (\text{Ec. 1.1.10})$$

La determinación del calor isostérico de sorción puede resultar muy útil si se pretende estimar la energía necesaria para la deshidratación de un determinado producto. Existen diferentes alternativas para su determinación. La metodología más utilizada es a partir de la aplicación de la ecuación de Clausius-Clapeyron (Ec. 1.1.11) a las isotermas de sorción experimentales obtenidas a diferentes temperaturas (Chirife e Iglesias, 1992; Sánchez et al., 1997; Kaymak-Ertekin y

Saltanoglu, 2001; Mulet et al., 2002a). En dicha ecuación se asume que el calor isostérico de sorción es independiente de la temperatura. Una de las principales desventajas que representa la utilización de esta metodología son los errores experimentales cometidos en la determinación de las isothermas, los cuáles se incrementan especialmente para humedades inferiores a 0.15 (b.h.). Según Chirife e Iglesias (1992) para un contenido de humedad del 5% la variabilidad del calor isostérico neto estimado puede llegar al 100%. En estas desviaciones también hay que tener en cuenta la variabilidad natural que por sí mismos presentan los productos agroalimentarios.

$$\left[ \frac{d \ln a_w}{dT} \right]_w = \frac{q_{sn}}{R T^2} \quad (\text{Ec.1.1.11})$$

La utilización de métodos calorimétricos para la determinación del calor isostérico (Sanjuán et al., 1994; Mulet et al., 1999a) representa una interesante alternativa si se dispone de la instrumentación adecuada. Sus principales inconvenientes son la cuidadosa manipulación de las muestras y el exacto control de las condiciones ambientales que se requiere. Sin embargo, son métodos fáciles y rápidos de realizar, y tienen una mayor exactitud a contenidos de humedad bajos.

Los métodos calorimétricos han sido sugeridos por muchos autores, sin embargo se han utilizado poco para la determinación del calor isostérico. Generalmente, la determinación se realiza a partir de las isothermas de sorción. Mulet et al. (1999a) compararon ambos métodos para la determinación del calor isostérico en un producto homogéneo (almidón de patata) y otro heterogéneo (coliflor) y en ambos casos las estimaciones fueron muy próximas.

### **1.1.3. Modelización de las cinéticas de secado**

A pesar de que la humanidad ha venido elaborando productos de forma satisfactoria basándose únicamente en la propia experiencia acumulada, la sociedad actual demanda la búsqueda de nuevos productos seguros, nutritivos y saludables.

La modelización matemática de procesos constituye una herramienta básica (Glasscock y Hale, 1994) en los nuevos sistemas de producción ya que permite estimar previamente cuál va a ser el desarrollo del proceso. La modelización previa permite la posterior optimización y control integral del proceso (Banga y Singh, 1994; Bon, 1998; Banga et al., 2003). La modelización de procesos se hace especialmente difícil cuando se trabaja con productos biológicos, dado su carácter heterogéneo, complejo y delicado (Chou y Chua, 2001).

En la modelización de un proceso de secado convectivo se pueden distinguir los siguientes apartados:

La **identificación de resistencias controlantes** constituye el primer paso de cara a abordar la modelización del proceso. En primer lugar se debe identificar si la velocidad del proceso está controlada por la transferencia de calor o por la de materia (Ratti, 2001). Cuando ambas resistencias sean significativas, el modelo deberá incluir ecuaciones que consideren la transferencia simultánea (Simal et al., 1998a). Si se asume que la velocidad del proceso está controlada por el proceso de transferencia de materia, también hay que especificar si la resistencia controlante de este proceso se localiza en la fase gaseosa (resistencia externa) o en el interior del sólido (resistencia interna).

**Selección del mecanismo de transferencia de materia.** Como anteriormente se ha mostrado en el Apartado 1.1.1.2, existen diferentes teorías que intentan explicar el movimiento del agua en el interior del sólido. De entre ellas, la más frecuentemente utilizada para

la modelización del proceso de secado es la teoría difusional (Mulet, 1994).

Además de estas teorías mecanicistas que intentan explicar el movimiento del agua utilizando leyes físicas, también se pueden utilizar modelos empíricos sin ningún tipo de fundamento físico. Los modelos empíricos no buscan explicar el proceso, su único objetivo es su descripción y la identificación de las variables más relevantes (Mulet, 1994). La investigación académica debe evitar este tipo de aproximaciones cuando sea posible, pero los modelos empíricos pueden ser muy útiles para aplicaciones industriales o para simplificar fenómenos complejos (Blasco et al., 2006).

**Planteamiento matemático del modelo.** Una vez seleccionada la teoría que se utilizará para describir el proceso de secado, el siguiente paso es la obtención de las ecuaciones matemáticas que describirán el proceso. Durante la obtención de las ecuaciones matemáticas representativas del proceso, frecuentemente se asumen una serie de hipótesis que pueden estar relacionadas con la homogeneidad e isotropía del sólido o con sus variaciones de volumen durante el secado.

**Propiedades del material.** En los modelos aparecen propiedades inherentes de los materiales que deben de ser identificadas de forma experimental. Entre ellas destacan propiedades físicas (Simal et al., 1993; Yang, 1999), propiedades estructurales y, como ya anteriormente se ha indicado, datos de sorción.

**Resolución de ecuaciones matemáticas.** El grado de complejidad de la resolución del modelo difusional planteado depende en gran medida del conjunto de condiciones de contorno asumidas. En función del objetivo de la modelización se pueden plantear modelos con diferentes grados de complejidad en la resolución (Mulet et al.,

1989a), lo que permite evaluar el esfuerzo requerido en la modelización y realizar la selección del modelo oportuno teniendo en cuenta este factor. Según las ecuaciones planteadas se podrán utilizar métodos de resolución analíticos como el método de separación de variables (Crank, 1975), o por el contrario en algunas ocasiones hay que recurrir a métodos de resolución numéricos como el de diferencias finitas (Simal et al., 1998b; Mulet et al., 2005; Garau et al., 2006) o el de elementos finitos (Kamyar y Aguirre, 1999; Irudayaraj y Wu, 1999; Gaston et al., 2002).

**Validación del modelo.** Una vez resuelto el modelo, es necesario su validación de cara a mostrar su fiabilidad (Mulet et al., 1989b). Una manera de validar el modelo es extrapolar los resultados obtenidos a otras condiciones experimentales y ver la capacidad de ajuste del modelo en dichas condiciones (Bon et al., 1997).

Además de considerarse como una herramienta para predecir el comportamiento de los procesos de secado o para la optimización o control del proceso, la modelización constituye una herramienta muy útil para evaluar la posibilidad de introducir una nueva tecnología en el proceso de secado. A partir de los resultados obtenidos con la modelización, se pueden extraer conclusiones para determinar su influencia en los diferentes mecanismos de transferencia de materia. Por lo tanto, la modelización del proceso de secado es una etapa básica y de mucha utilidad cuando se evalúa la aplicación de una nueva tecnología durante el proceso de secado.

#### **1.1.3.1. Modelo difusional**

La teoría difusional fue formulada por Lewis (1921) y posteriormente desarrollada por Sherwood (1929). A partir de la ley de Fick, y realizando un balance microscópico de materia en un volumen control se obtiene la ecuación de gobierno del problema de transferencia de materia (Simal et al., 1998b). Las Ec.

1.1.12 y Ec. 1.1.13 muestran respectivamente las ecuaciones de gobierno que se obtienen para las geometrías de lámina infinita y cilindro infinito suponiendo que el material es homogéneo e isótropo y que la difusividad efectiva ( $D_e$ ) es constante.

$$\frac{\partial W_p(x,t)}{\partial t} = D_e \left( \frac{\partial^2 W_p(x,t)}{\partial x^2} \right) \quad (\text{Ec. 1.1.12})$$

$$\frac{\partial W_p(r,t)}{\partial t} = D_e \left( \frac{\partial^2 W_p(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial W_p(r,t)}{\partial r} \right) \quad (\text{Ec. 1.1.13})$$

Donde  $x$  y  $r$  representan respectivamente las direcciones de movimiento características de las geometrías de lámina infinita y cilindro infinito.

Los modelos difusionales son fáciles de formular y normalmente proporcionan resultados razonables. Su principal inconveniente recae frecuentemente en las suposiciones que se tienen en cuenta para poder resolverlo. Generalmente, se asume una difusividad efectiva que incluye los efectos relacionados con la cinética, tanto los conocidos como los fenómenos desconocidos.

En la bibliografía aparecen diversos modelos difusionales con diferente grado de complejidad según consideren o desprecien los siguientes aspectos:

- La variación de volumen de las muestras durante el secado (Mulet et al., 2000; Mayor y Sereno, 2004; Katekawa y Silva, 2006).
- La influencia de la humedad en la difusividad efectiva (Mulet, 1994; Teixeira y Tobinaga, 1998; Maroulis et al., 2001; Wen-Jia et al., 2003; Ruiz-Cabrera et al., 2005a; Ruiz-Cabrera et al., 2005b).
- La resistencia externa a la transferencia de materia (Mazza y Lemaguer, 1980; Mulet et al., 1987; Krokida et al., 2001; Krokida et al., 2002; Simal et al., 2003a; Mulet et al., 2005).

### **1.1.3.2. Modelo de Weibull**

El modelo empírico de Weibull está basado en una función probabilística usada para describir el comportamiento de sistemas complejos variantes (Cunha et al., 1998). Inicialmente se utilizó para predecir fallos por fatiga de materiales. Su utilización en tecnología de alimentos se centra en la descripción de procesos degradativos, ya que la degradación del alimento se puede considerar como un fallo del sistema alimento al someterse a unas condiciones determinadas de estrés (Blasco, 2003). Se ha utilizado para la modelización de cinéticas de secado de diversos alimentos, entre otros; higos, pasas y ciruelas (Karathanos y Belessiotis, 1999), cebollas (Wang, 2002), uvas (Azzouz et al., 2002), arroz (Basunia y Abe, 2001), lechugas y coliflores (López et al., 2000), dátiles (Hassan y Hobani, 2000), manzanas (Cunha et al., 2001), rizomas de curcuma (Blasco et al., 2006) y kiwi (Simal et al., 2005a). El modelo de Weibull es presentado en la Ec. 1.1.14.

$$\psi = \exp\left(-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right) \quad (\text{Ec. 1.1.14})$$

$\alpha$  y  $\beta$  son los parámetros del modelo de Weibull.  $\alpha$  es el parámetro de forma y se asimila a un índice de comportamiento del producto durante el secado. A medida que aumenta su valor, disminuye la velocidad inicial del proceso de secado. Si es superior a 1 predice tiempos muertos del proceso y si es igual a la unidad, el modelo presenta una cinética de primer orden.

El parámetro  $\beta$  está relacionado con la cinética del proceso, presentando una relación inversa con la velocidad del mismo (Blasco et al., 2006). El parámetro  $\beta$  engloba el efecto en la cinética de variables como temperatura, velocidad del aire y tamaño de partícula.

#### **1.1.4. Liofilización a presión atmosférica**

##### **1.1.4.1. Descripción del proceso**

La liofilización es una técnica de deshidratación que se basa en la separación del agua por sublimación. La liofilización convencional se realiza en condiciones de vacío. Debido a la ausencia de agua líquida y a las bajas temperaturas empleadas en el proceso, la cinética de las reacciones deteriorativas se reduce enormemente, dando lugar a productos de calidad excelente (Ratti, 2001; Chen et al., 2007) en comparación con productos secados por aire caliente. Las principales desventajas de la liofilización son su elevado coste y la baja velocidad del proceso (Nijhuis et al., 1998), lo que reduce su aplicabilidad a productos de elevado valor económico.

La liofilización a presión atmosférica es una alternativa que intenta salvar los problemas de la liofilización tradicional (Alves-Filho y Strommen, 1996b; Di Matteo et al., 2003; Strommen et al., 2003; Garcia-Pascual et al., 2004; Eikevik et al., 2005; Strommen et al., 2006). Consiste en la deshidratación convectiva a temperaturas inferiores al punto de congelación de los alimentos, pero operando a presión atmosférica. Esta deshidratación puede realizarse en secaderos convectivos con bomba de calor, lo que permite trabajar en un rango de temperaturas que oscila entre -20 y 110 °C (Strommen et al., 2003).

##### **1.1.4.2. Aplicaciones. Ventajas e inconvenientes**

La liofilización a presión atmosférica se ha utilizado para el secado de diversos productos agroalimentarios como zanahorias (Alves-Filho y Strommen, 1996b), guisantes (García-Pascual et al., 2004), champiñones (García-Pascual, 2004), pimiento (Alves-Filho et al., 2006), manzanas y fresas (Alves-Filho y Strommen, 1996b), peras (Alves-Filho et al., 1997), gambas (Alves-Filho y Strommen, 1996b) y bacalao (Eikevik et al., 2005). Se pueden encontrar aplicaciones de liofilización a presión atmosférica tanto en lecho fluidizado como en lecho fijo. Los productos secos obtenidos por liofilización a presión atmosférica

presentan una calidad cercana a los obtenidos con la liofilización a vacío, y muy superior a la de los secados con aire caliente. A su vez, los costes de esta tecnología son muy inferiores a los de la liofilización a vacío. Los trabajos anteriormente citados muestran algunas de las ventajas de los productos liofilizados a presión atmosférica entre las que destacan su mejor color, menor encogimiento y mayor capacidad de rehidratación en comparación con los secados por aire caliente.

Otra de las ventajas principales que presenta la liofilización a presión atmosférica con bomba de calor es su elevada eficiencia energética con respecto a los secaderos tradicionales por aire caliente (Strommen y Kramer, 1994; García-Pascual, 2004). El impacto medioambiental puede verse reducido en gran medida con la utilización de refrigerantes con bajos niveles contaminantes, como por ejemplo el CO<sub>2</sub> (Alves-Filho, 2002). Frente a la liofilización a vacío, la eliminación de la cámara de vacío y el equipo auxiliar asociado incrementan de forma significativa su aplicabilidad.

Por el contrario, una desventaja importante de esta tecnología es la baja velocidad del proceso como consecuencia de las bajas temperaturas utilizadas y el descenso de la velocidad de sublimación al aumentar la presión. La utilización de bombas de calor permite realizar experiencias de secado donde se combinan temperaturas por debajo del punto de congelación (entre -15 y -5 °C) en el inicio del secado y temperaturas por encima de 0 °C (entre 15 y 30 °C) cuando la humedad desciende por debajo del 40 % (b.h.). La combinación de temperaturas permite aumentar la velocidad del proceso, sin una reducción significativa de la calidad del producto (Alves-Filho y Strommen, 1996b). La búsqueda de nuevas tecnologías que puedan aplicarse durante la liofilización atmosférica para acelerar el proceso constituye un campo muy interesante de investigación. Una de las características principales de estas tecnologías debe ser que no produzcan un aumento importante de la temperatura del producto.

### **1.1.5. Nuevas tecnologías aplicadas al secado convectivo**

El secado convectivo presenta actualmente algunas limitaciones (Cohen y Yang, 1995; Nijhuis et al., 1998; Mayor y Sereno, 2004; Lewicki, 2006), que la comunidad científica debe considerar como retos u oportunidades de cara a mejorar el proceso. Entre estas limitaciones, se encuentran principalmente, la baja velocidad del proceso y la pérdida de calidad del producto durante el secado. La velocidad de secado es especialmente baja durante el periodo de velocidad decreciente (Clary et al., 2005; Zhang et al., 2005) y este factor es especialmente destacable cuando se trabaja a bajas temperaturas, como en la liofilización a presión atmosférica (Alves-Filho y Strommen, 1996a; Strommen y Jonansen, 1996). La evaporación del agua durante el secado causa cambios químicos, físicos y biológicos en los alimentos (Lewicki, 2006), algunos de los cuales pueden afectar considerablemente a la calidad del producto. El encogimiento, el encostramiento y la deformación del material, la pérdida del color natural o el pardeamiento, la pérdida del aroma y la textura, la pobre capacidad de rehidratación y la pérdida del valor nutricional de los alimentos, son algunas de las deficiencias más evidentes que se encuentran en los productos secos y que son derivadas de su procesado (Lewicki, 2006).

La aplicación de nuevas tecnologías como fuentes de energía adicionales durante el secado convectivo podría suponer la resolución de alguna de sus limitaciones. La combinación de tecnologías debe evaluarse no sólo teniendo en cuenta la influencia en las principales variables del proceso, como velocidad y costes energéticos, sino también en la influencia sobre la calidad del producto (Chou y Chua, 2001). Algunas de las principales tecnologías aplicadas son las microondas, la radiofrecuencia, la radiación infrarroja y los ultrasonidos de potencia.

#### **1.1.5.1. Microondas**

Las microondas se han utilizado tanto para el calentamiento como para el secado de alimentos, solas o en combinación con métodos de secado convectivo.

Las microondas son ondas electromagnéticas cuya longitud está comprendida entre 300-300000 MHz (Cohen y Yang, 1995). La energía de la onda interactúa con la materia generando calor y estableciendo una determinada presión de vapor en el interior del producto (Chou y Chua, 2001). Este efecto produce un bombeo de humedad hacia la superficie (Turner y Jolly, 1991) que repercute de forma positiva en la calidad del producto ya que no genera encostramientos y aumenta de forma significativa la velocidad del proceso.

Los métodos de secado que aplican sólo microondas tienen importantes limitaciones (Zhang et al., 2006), entre las que se puede mencionar el calentamiento no uniforme, posibles daños en la textura, limitada penetración de la radiación en el producto y baja eficiencia energética. La combinación con otras tecnologías puede reducir estas deficiencias. El secado por aire caliente asistido por microondas ha sido utilizado tanto para mejorar la velocidad del proceso como para mejorar la calidad del producto. La aplicación de microondas puede realizarse en todo el proceso, en el inicio del secado o durante el periodo de velocidad decreciente, en función del objetivo que se persiga. La combinación de estas tecnologías ha sido aplicada para la deshidratación de multitud de vegetales y frutas, como manzana (Funebo et al., 2002; Ahrne et al., 2003), patata (Ahrne et al., 2003; Wen-Jia et al., 2003), zanahoria (Wen-Jia et al., 2003) o naranja (Ruiz-Díaz et al., 2003).

Las microondas también han sido aplicadas a procesos de secado a vacío (Clary et al., 2005; Cui et al., 2005) y durante la liofilización (Wang y Chen, 2003; Wu et al., 2004) a pesar de que su uso produce un calentamiento del producto importante.

A pesar de las ventajas que a priori aporta el secado asistido por microondas, actualmente las aplicaciones industriales son escasas (Zhang et al., 2006).

### ***1.1.5.2. Radiofrecuencia***

Las ondas de radio, al igual que las microondas, son ondas electromagnéticas. Las aplicaciones más frecuentes de las ondas de radio se dan a frecuencias comprendidas entre 10 y 100 MHz (Cohen y Yang, 1995; Chou y Chua, 2001). Las ondas de radio generan calor en todo el volumen del alimento, por los efectos combinados de rotación dipolar (campo alterno) y efectos de conducción (campo continuo) que podrían acelerar la velocidad de secado (Chou y Chua, 2001). El campo eléctrico se puede mantener continuo o alterno en función del efecto predominante que se busque (Nijhuis et al., 1998). Su utilización puede ser muy interesante para mejorar el color de productos que son altamente susceptibles a la degradación ya que el secado transcurre desde el interior al exterior del producto, lo que minimiza la aparición de defectos en la superficie del sólido. La uniformidad durante el secado también evita la rotura del material por encogimiento no uniforme y los defectos de forma.

Al igual que las microondas, las ondas de radio se han utilizado en combinación con métodos de secado convectivos y su aplicación se puede realizar durante todo el proceso o en momentos concretos (Jumah, 2005).

### ***1.1.5.3. Radiación infrarroja***

La radiación infrarroja ayuda a reducir el tiempo de secado por aporte de calor sensible durante el secado de alimentos (Lewicki et al., 1998). La energía es transferida desde la fuente que la genera hasta la superficie del producto sin calentar al aire que los separa (Jones, 1992). Entre otras ventajas de esta técnica destacan los elevados coeficientes de transferencia de calor, la fácil direccionalidad de la radiación hasta la superficie del producto, los tiempos rápidos de respuesta que facilitan el control del proceso y la fácil incorporación a los sistemas de secado tradicionales (Chou y Chua, 2001).

La aplicación en sistemas combinados con métodos convectivos convencionales permite la reducción del tiempo de secado (Chua y Chou, 2005).

En las primeras etapas del secado la radiación infrarroja puede incrementar de forma significativa la evaporación de agua en la superficie del producto húmedo (Mujumdar y Devahastin, 2000). Es necesario un buen control del sistema para evitar el sobrecalentamiento del producto por el elevado flujo de calor existente. La aplicación intermitente de la radiación infrarroja evita muchos problemas de deterioro de la calidad del producto, en contraposición de lo que sería una aplicación continua.

La radiación infrarroja se ha aplicado en combinación con las microondas para el secado de pan (Tireki et al., 2006), melocotón (Wang y Sheng, 2006), zanahoria y ajo (Baysal et al., 2003).

#### ***1.1.5.4. Ultrasonidos de potencia***

La energía acústica de elevada intensidad y baja frecuencia se ha utilizado para incrementar la velocidad de secado. A diferencia de otras tecnologías como microondas, radiofrecuencia o radiación infrarroja, los ultrasonidos de potencia no producen un calentamiento significativo del material. Asociados a la energía acústica se encuentran una serie de efectos que pueden ser responsables de la aceleración del proceso de secado. El bajo efecto térmico de los ultrasonidos de potencia podría favorecer su aplicación en el secado de materiales sensibles al calor (Fairbanks, 1975). A su vez, su aplicación también puede resultar interesante para tecnologías de secado que utilizan bajas temperaturas como la liofilización a presión atmosférica.

A pesar del potencial que tienen los ultrasonidos de potencia, actualmente la aplicación de esta tecnología en el secado de productos está poco desarrollada. El presente trabajo pretende profundizar en la aplicación de los ultrasonidos de potencia en el secado convectivo de alimentos de cara a contribuir a su desarrollo científico-tecnológico.

## **1.2. ULTRASONIDOS**

### **1.2.1. Generalidades**

La energía acústica es uno de los tipos fundamentales de energía que se encuentra en la naturaleza. Los sonidos son oscilaciones mecánicas en el tiempo que tienen lugar en el seno del material por el que se propagan (Cárcel, 2003). A diferencia de las ondas electromagnéticas, como las microondas, las ondas acústicas necesitan de un medio material para su propagación al tratarse de ondas elásticas. Así, las ondas electromagnéticas pueden transmitirse por el vacío mientras que el sonido no.

Los ultrasonidos son ondas acústicas de frecuencia superior a 20 kHz, valor que representa el límite de audición humano (Raj et al., 2004). Esta clasificación no está basada en ningún tipo de fundamento físico, ya que las leyes de generación y propagación del sonido son las mismas en todo el espectro de frecuencia.

La presencia de los ultrasonidos en la naturaleza está bastante extendida. Algunos animales tienen su límite de audición en el rango de frecuencias ultrasónicas. Así por ejemplo, el límite superior de los perros alcanza los 50 kHz y en los murciélagos o en los delfines llega hasta los 100 kHz. La comunicación de estos animales con el entorno que los rodea está basada en gran medida en la utilización de los ultrasonidos.

En 1880 el matrimonio Curie descubre el efecto piezoeléctrico, fenómeno en el que se basan algunos de los actuales sistemas generadores de ultrasonidos, por lo que esta fecha se puede considerar como fecha de inicio de la utilización de los ultrasonidos. Galton en 1883 desarrolla el primer transductor ultrasónico, que fue un silbato utilizado para estudiar el límite de audición humano. El “rastreador de ecos” (eco-sounder) fue la primera aplicación comercial de los ultrasonidos. Este equipo fue diseñado y construido por Langevin en 1917 y posteriormente dio lugar al SONAR (**SO**und **N**avigation **A**nd **R**anking), que fue muy utilizado en la II

Guerra Mundial para la detección submarina. Otras aplicaciones ultrasónicas han sido el microscopio ultrasónico de barrido, aplicaciones médicas de inspección no destructiva (por ejemplo las ecografías), supervisión de soldaduras y detección de grietas.

La aplicación de ultrasonidos a elevada potencia y baja frecuencia puede afectar a los procesos o productos. Este fenómeno fue descubierto en las hélices de los barcos a finales del siglo XIX. Se observó que si su movimiento de giro era muy rápido se producían burbujas de cavitación, que al romperse erosionaban la hélice. El desarrollo de equipos para la aplicación de ultrasonidos a elevadas potencias se ha incrementado desde la segunda mitad del siglo XX.

#### ***1.2.1.1. Propagación y tipos de onda***

La fuente que produce la onda ultrasónica suele ser un cuerpo vibrante. El movimiento de vibración de dicho cuerpo se comunica a las partículas del medio que le rodean, las cuales comienzan a oscilar, comunicando la energía de forma también oscilante a las partículas vecinas (Mason y Lorimer, 2002). Según el tipo de vibración en el medio, las ondas ultrasónicas se pueden clasificar en tres tipos: ondas longitudinales, transversales y de superficie.

Las partículas en las ondas longitudinales vibran paralelas a la dirección de propagación de la onda (Recuero, 1995). En cambio en las transversales, la vibración de la partícula es perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Las ondas longitudinales pueden representarse, de igual manera que las ondas transversales, con una zona de máxima presión y densidad, denominada compresión o cresta, y otra de mínima presión y densidad. Las ondas transversales no viajan en líquidos o gases dado que estos medios no tienen suficiente elasticidad para su propagación (Benedito, 1998), por lo que sólo aparecen en sólidos (Cárcel, 2003). A las ondas que viajan dentro de una distancia muy corta de la superficie se les denomina ondas de superficie o de Rayleigh. Son similares a las que se producen en el agua al lanzar una piedra.

### **1.2.1.2. Parámetros ultrasónicos**

Al igual que cualquier tipo de onda, las ondas ultrasónicas se caracterizan por una serie de parámetros.

#### **Frecuencia (f, Hz)**

La frecuencia de una onda se define como el número de vibraciones o ciclos completados por la onda en una unidad de tiempo. La unidad utilizada en el Sistema Internacional es el Hercio (Hz), que se define como el número de ciclos completados por una onda en un segundo. Al inverso de la frecuencia se le denomina periodo y se define como el tiempo necesario para que la onda realice un ciclo (Figura 1.2.1).

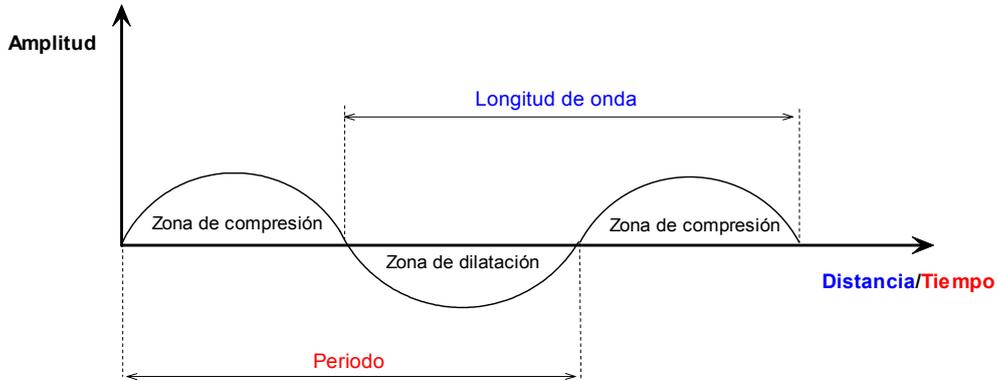
#### **Velocidad (c, m/s)**

La velocidad acústica es la velocidad de propagación de la onda. La velocidad de propagación de las ondas longitudinales y transversales es característica del material y, en general, puede considerarse constante para un material dado (Povey, 1997; Povey 1998), aunque puede verse afectada por variables ambientales como la temperatura y presión.

#### **Longitud de onda ( $\lambda$ , m)**

La longitud de onda es la distancia entre dos planos en los que las partículas se encuentran en el mismo estado de vibración, o lo que es igual, la distancia entre dos puntos consecutivos que vibran en fase (Figura 1.2.1). Se determina a partir de la velocidad de la onda y la frecuencia (Ec. 1.2.1).

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (\text{Ec. 1.2.1})$$



**Figura 1.2.1. Propagación de una onda ultrasónica. Parámetros característicos.**

#### **Amplitud (A, m)**

La amplitud de onda es el máximo desplazamiento de la partícula desde la posición de equilibrio (Figura 1.2.1)

#### **Presión acústica ( $P_A$ , $N/m^2$ )**

La presión acústica es la presión existente en las diversas zonas del material. Esta presión será mayor que la normal en las zonas de contracción de partículas y menor en las zonas dilatadas, por lo que la presión acústica es alterna (Figura 1.2.1). La desviación máxima en relación a la normal se denomina amplitud de la presión acústica y está relacionada con la amplitud de oscilación de la onda.

#### **Intensidad acústica (I, $W/m^2$ )**

La intensidad de una onda acústica se define como la energía media transmitida a través de la unidad de área perpendicular a la dirección de propagación de la onda por unidad de tiempo. La intensidad acústica es proporcional al cuadrado de presión acústica máxima (Ec. 1.2.2) (Mason y Lorimer, 2002).

$$I = \frac{P_A^2}{2\rho c} \quad (\text{Ec. 1.2.2})$$

**Densidad de energía (E, J/m<sup>3</sup>)**

Al propagarse una onda, se transmite energía que puede ser disipada en forma de calor debido al trabajo realizado al desplazar las partículas en un medio sujeto a fuerzas contrarias al desplazamiento de las mismas. La densidad de energía puede expresarse como el cociente entre la intensidad acústica y la velocidad de propagación de la onda:

$$E = \frac{I}{c} \quad (\text{Ec. 1.2.3})$$

La densidad de energía se mide en unidades de J/m<sup>3</sup>. Si la energía se expresa en Newton por metro (Nm), las unidades de la densidad de energía se transforman en N/m<sup>2</sup>, es decir en unidades de presión. Es decir, la densidad de energía es equivalente al nivel de presión acústica.

**Potencia acústica (P, W)**

La potencia acústica es la energía total irradiada por la fuente ultrasónica por unidad de tiempo. Se puede calcular a partir de la intensidad acústica y del área de la superficie radiante (Ec. 1.2.4).

$$P = I S \quad (\text{Ec. 1.2.4})$$

La potencia puede expresarse en notación decibélica a partir de la relación logarítmica entre la intensidad (o potencia) acústica existente en un medio y la intensidad (o potencia) acústica de referencia (Ec. 1.2.5).

$$P_{dB} = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (\text{Ec. 1.2.5})$$

De igual manera que en el caso de la potencia, la presión acústica puede referirse en notación decibélica (Ec. 1.2.6).

$$P_{AdB} = 10 \log \frac{P_A^2}{P_{A0}^2} \quad (\text{Ec. 1.2.6})$$

Generalmente se toma como valor de  $I_0$   $1 \times 10^{-12}$  (W/m<sup>2</sup>) y de  $P_{A0}$   $2 \times 10^{-5}$  (Pa).

### **Impedancia acústica (Z)**

Se define como la relación entre la presión acústica y la velocidad de vibración de la partícula. Es un parámetro muy importante para determinar la proporción de energía que se refleja y la que se transmite cuando una onda acústica cambia de medio.

Al igual que le ocurre a la luz, cuando la onda ultrasónica llega a una interfase una parte es reflejada y otra transmitida. La proporción de energía reflejada depende en gran medida de la diferencia de impedancias entre los dos medios. Cuanto mayor sea la diferencia, mayor será la energía reflejada y menor la transmitida.

Esta característica presenta una gran importancia en las aplicaciones de los ultrasonidos. Si la proporción de energía reflejada es mayor que la transmitida, los efectos de los ultrasonidos serán más intensos en la interfase. Si por el contrario, la energía transmitida es mayor, los efectos de los ultrasonidos podrán observarse en el interior del segundo medio.

### **Atenuación**

En la propagación de la onda ultrasónica por un medio, la intensidad de la onda disminuye al aumentar la distancia a la fuente que la produce. Este fenómeno es conocido como atenuación. La Ec. 1.2.7 muestra la expresión para el cálculo de la intensidad acústica de la onda en un punto situado a una cierta distancia (d) de la fuente productora.

$$I = I_0 \exp(-\alpha_a d) \quad (\text{Ec. 1.2.7})$$

La atenuación puede ser consecuencia de la reflexión, la dispersión o la difracción de la onda durante su propagación, o como consecuencia de la conversión de parte de la energía cinética de la onda en calor. La atenuación es más importante conforme aumenta la frecuencia de la onda debido al incremento del coeficiente de atenuación ( $\alpha_a$ ) (Mason y Lorimer, 2002).

### 1.2.1.3. Clasificación

Las ondas acústicas se clasifican en función de la frecuencia del intervalo de audición humano situado entre 20 Hz y 20 kHz. A las ondas de frecuencia inferior a los 20 Hz, se les denomina subsonidos y por encima de 20 kHz, se encuentran los ultrasonidos.



**Figura 1.2.2. Clasificación del sonido en función de la frecuencia.**

Por otra parte, los ultrasonidos se pueden clasificar según sus aplicaciones industriales, a partir de su frecuencia y su intensidad (McClements, 1997). Por un lado, se encuentran los ultrasonidos de potencia, también conocidos como de alta intensidad, con frecuencias comprendidas entre 20 y 100 kHz e intensidades superiores a 1 W/cm<sup>2</sup>. Los ultrasonidos de potencia pueden producir cambios en los materiales o afectar a los procesos. Por el otro lado, se encuentran los ultrasonidos de señal, también conocidos como de baja potencia o intensidad o de alta frecuencia. Se caracterizan por utilizarse en frecuencias que oscilan entre los 100 kHz y los 20 MHz e intensidades inferiores a 1 W/cm<sup>2</sup>. Los ultrasonidos de

señal no afectan a los productos ni a los procesos ya que la energía involucrada es débil. Se utilizan para el control de procesos o el análisis no destructivo de materiales. Generalmente, los ultrasonidos de potencia se aplican en forma continua mientras que los de señal se aplican en pulsos.

Por último, sólo si se tiene en cuenta la frecuencia, la división entre ultrasonidos de potencia y de señal es meramente arbitraria. Por ejemplo, hay aplicaciones de ultrasonidos de potencia a frecuencias cercanas a 300 kHz (Cárcel, 2003).

En tecnología de alimentos, son importantes tanto las aplicaciones de los ultrasonidos de potencia como las de señal.

### **1.2.2. Ultrasonidos de señal**

#### ***1.2.2.1. Aplicaciones en Tecnología de Alimentos***

Las aplicaciones de los ultrasonidos de señal se basan en la información que se puede extraer de la onda acústica cuando atraviesa un material ya que algunos de sus parámetros varían en función de las propiedades físicas del medio que atraviesan (Mulet et al., 1999c). Los principales parámetros que se suelen tener en cuenta en estas aplicaciones son la velocidad de la señal ultrasónica, la atenuación y el espectro de frecuencias (Povey, 1998).

Entre las aplicaciones de los ultrasonidos de señal en Tecnología de Alimentos se pueden distinguir dos grandes grupos: aplicaciones para el control de las variables de un proceso y aplicaciones para el análisis no destructivo de los alimentos. Teniendo en cuenta el número de trabajos que se están publicando en la actualidad en el campo agroalimentario el futuro de esta tecnología está más que asegurado.

Entre las aplicaciones relacionadas con el control de procesos destacan la medida del contenido de recipientes y la velocidad del flujo en tuberías (Povey, 1998).

En relación al análisis no destructivo de materiales, las aplicaciones ultrasónicas son numerosas (Benedito, 1998; Mulet et al., 1999b; Mulet et al., 2002b). Los ultrasonidos de señal se han utilizado para medir diferentes parámetros de calidad en frutas (Mizrach et al., 1994; Mizrach et al., 2003; Mizrach, 2004; Camarena y Martínez-Mora, 2006). En sistemas multicomponentes, conociendo la velocidad ultrasónica en cada componente y la velocidad global en el sistema a varias temperaturas se puede estimar su composición. Este principio ha sido utilizado para determinar la composición de filetes de bacalao (Ghaedian et al., 1997), mezclas de grasa y carne de cerdo (Benedito et al., 2001a), sobrasada (Llull et al., 2002; Simal et al., 2003b) y alpechín (Benedito et al., 2004). Una de las aplicaciones ultrasónicas que se encuentra muy extendida a nivel comercial, es la medida del espesor de grasa en canales de animales (Cross y Belk, 1994).

Las aplicaciones de los ultrasonidos de señal también están muy extendidas en el campo de grasas y aceites y en el de lácteos. En relación al campo de grasas y aceites, McClements y Povey (1987) determinaron la cantidad de grasa sólida en una mezcla de aceites con una elevada exactitud a partir de medidas ultrasónicas. Benedito et al. (2002) determinaron usando ultrasonidos la variación de calidad del aceite durante la fritura. En el campo de los lácteos, los ultrasonidos se han utilizado para determinar el grado de madurez de diferentes tipos de quesos (Benedito et al., 2000a; 2000b; 2006), donde las medidas ultrasónicas se han correlacionado bien con medidas instrumentales o sensoriales (Benedito et al., 2000b). También se han utilizado técnicas ultrasónicas para detectar la profundidad de defectos internos en los quesos (Benedito et al., 2001b) o para determinar el momento óptimo de corte de la cuajada en la fabricación de queso (Gunasekaran y Ay, 1996).

### **1.2.3. Ultrasonidos de potencia**

Antes de entrar a describir aplicaciones de los ultrasonidos de potencia, convendría hacer una pequeña descripción de cómo se generan este tipo de ondas, lo que ayudaría en la comprensión de sus efectos.

#### **1.2.3.1. Sistemas de generación**

En general, la producción de ultrasonidos consiste en la conversión de cualquier otro tipo de energía en energía acústica (Carlin, 1972). Los dos componentes esenciales de un sistema ultrasónico son una fuente de energía y un transductor (Cárcel, 2003). El transductor es el encargado de transformar la energía proporcionada por la fuente (eléctrica, magnética o mecánica) en energía acústica con las características de intensidad y frecuencia deseadas (Recuero, 1995).

Un transductor ultrasónico está constituido por un elemento principal y una serie de elementos secundarios o pasivos. El elemento principal es el responsable de la producción de los ultrasonidos. La energía que proviene de la fuente provoca una serie de cambios en su forma o dimensiones que provocan la aparición de la onda mecánica. Los elementos pasivos se encargan de mejorar la transferencia de la energía acústica. Según Gallego-Juárez (1999) los principales parámetros a considerar en los transductores son la capacidad de potencia, el rendimiento en la conversión de un tipo concreto de energía en energía acústica, la amplitud y distribución de la vibración y la direccionalidad de la radiación emitida.

Los transductores se pueden clasificar en 3 grandes grupos en función de la forma de ser excitados para generar las ondas ultrasónicas: los transductores operados mediante fluidos, los transductores magnetostrictivos y los transductores piezoeléctricos.

### **Transductores operados mediante fluidos**

Estos transductores se basan en la conversión de la energía cinética de un fluido en energía acústica. Se pueden clasificar en función del tipo de fluido utilizado en transductores operados por gases o por líquidos. Entre los primeros, el ejemplo más popular posiblemente lo constituya el silbato cuyo funcionamiento se basa en hacer pasar un chorro de aire a una cavidad a través de un orificio. Otro ejemplo son las sirenas, donde la generación de ultrasonidos se consigue gracias al rápido movimiento de un sólido por acción de una corriente de gas a presión (Mason y Lorimer, 2002).

El funcionamiento de los transductores operados por líquidos consiste en bombear un fluido a una cámara a través de un orificio. La cámara dispone de una lámina de acero delgado que empieza a vibrar por la acción de la corriente y que por tanto produce la onda acústica. Estos sistemas son muy utilizados en aplicaciones de homogenización y mezclado.

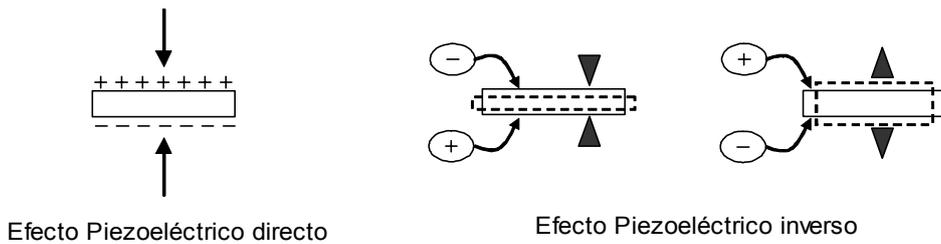
### **Transductores magnetostrictivos**

Su funcionamiento se basa en la capacidad que tienen algunos materiales, como el níquel, de reducir su tamaño cuando se colocan en un campo magnético y de recobrar su tamaño cuando el campo desaparece (Cárcel, 2003). Si el campo se aplica en forma de pulsos, la frecuencia de la onda ultrasónica producida es igual a la frecuencia de aplicación de los pulsos.

Este tipo de transductores fueron los primeros utilizados para la generación de ultrasonidos de alta intensidad. La principal ventaja es que son muy robustos y duraderos además de proporcionar señales muy potentes (Kuttruff, 1991). Sin embargo, presentan dos importantes limitaciones que condicionan su utilización. La primera, es que no se pueden generar frecuencias superiores a 100 kHz. Y la segunda, es que la eficiencia eléctrica es muy baja lo que conlleva importantes pérdidas en forma de calor.

**Transductores piezoeléctricos**

El fundamento de estos transductores se basa en el efecto piezoeléctrico que presentan algunos cristales. El efecto piezoeléctrico directo consiste en que al ejercer una presión sobre el cristal se genera una carga en cada cara del cristal de igual intensidad pero de sentido contrario (Figura 1.2.3). El efecto piezoeléctrico inverso ocurre cuando al aplicar una carga igual pero de sentido contrario en cada una de las caras del cristal, éste se contrae o se expande en función de la polaridad de las cargas. Si se aplica una corriente eléctrica alterna de elevada frecuencia se puede provocar una vibración en el material que conlleva la generación de la onda ultrasónica. El funcionamiento óptimo de un determinado cristal se da para su frecuencia de resonancia, que depende de las dimensiones del cristal.



**Figura 1.2.3. Efecto piezoeléctrico.**

El efecto piezoeléctrico lo presentan materiales naturales, tales como, el cuarzo, la turmalina y la sal de Rochelle. Al ser el efecto muy pequeño en estos materiales, se han desarrollado materiales con propiedades mejoradas, por ejemplo materiales cerámicos ferroeléctricos policristalinos (Raj et al., 2004), como el Titanato de Bario y el Zirconato Titanato de Plomo, conocidos como cerámicas piezoeléctricas.

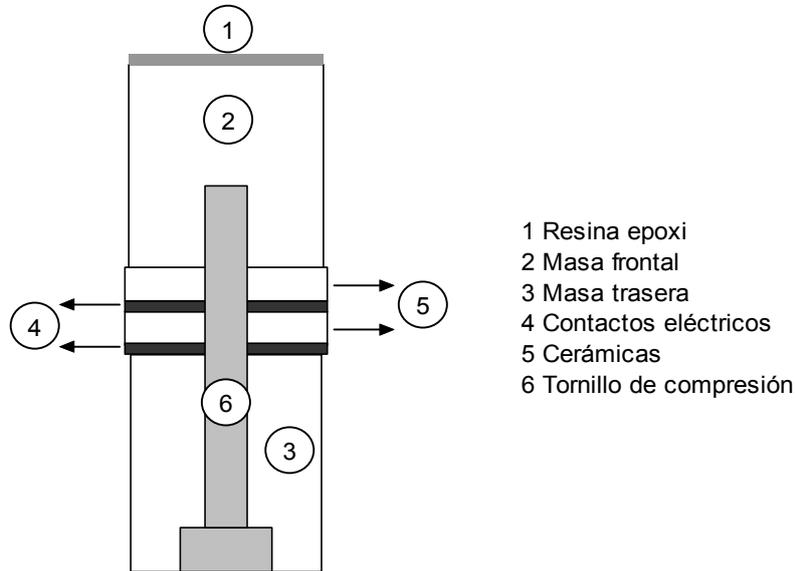


Figura 1.2.4. Transductor piezoeléctrico tipo sándwich.

Las cerámicas constituyen el elemento principal del transductor, al que se le añaden elementos metálicos para protegerlas, ya que son frágiles, y para que actúen de sumideros de calor previniendo su sobrecalentamiento. Los materiales metálicos utilizados son de alta calidad destacando el titanio. Una de las disposiciones más utilizadas en la aplicación de ultrasonidos de potencia es el sistema “sándwich” (Figura 1.2.4). Se monta a partir de una pareja de cerámicas, conectadas con las polarizaciones en sentido opuesto, a las que se le acoplan dos masas cilíndricas metálicas que comprimen la estructura con un tornillo colocado en el eje axial. La longitud de los cilindros metálicos está relacionada con la longitud de onda de la señal acústica. El cilindro frontal será el que aplique la onda ultrasónica generada al medio a tratar. En algunas ocasiones una resina epoxi protege su superficie.

Los transductores piezoeléctricos son los más utilizados en la actualidad. Sus principales ventajas son la capacidad de producir ultrasonidos a potencias elevadas, cubrir todo el rango de frecuencias y presentar unos factores de conversión de energía eléctrica muy elevados, en algunas ocasiones superiores al

95 %. Sus principales limitaciones son la despolarización de las cerámicas a elevadas temperaturas, por encima de 100-120 °C, y el paulatino envejecimiento de las mismas.

### **1.2.3.2. Sistemas de aplicación**

El equipo necesario para la aplicación de ultrasonidos de potencia consta de tres partes fundamentales: generador, transductor y emisor. El generador es el encargado de transformar la señal eléctrica de la red a la frecuencia deseada. En algunas ocasiones el mismo equipo también realiza funciones de amplificador de la señal. El transductor, como ya se ha indicado anteriormente, es el equipo encargado de la conversión de la señal eléctrica de alta frecuencia en vibraciones mecánicas. El último elemento es el emisor que irradia la energía acústica generada por el transductor al medio a tratar. Este sistema en algunas ocasiones puede producir modificaciones en la señal como, por ejemplo, amplificarla.

Los sistemas de aplicación de ultrasonidos de potencia se pueden agrupar en dos grandes tipos según se utilicen en medios líquidos o gaseosos.

#### **Sistemas de aplicación de ultrasonidos en medios líquidos**

Dentro de este tipo de sistemas destacan principalmente los baños de ultrasonidos y los sistemas tipo sonda

##### Baños de ultrasonidos

Los baños de ultrasonidos posiblemente sean la aplicación más popular de los ultrasonidos de potencia. Aunque se utilicen normalmente como equipos de limpieza de material de laboratorio, hay un gran número de referencias bibliográficas en los que se han utilizado para acelerar los procesos de transferencia de materia en medios líquidos (Mason, 1998). Se pueden calificar como equipos ultrasónicos simples y compactos, con los transductores colocados en la base de un recipiente de acero inoxidable y con el sistema de generación y

amplificación incluidos en el mismo recipiente. La potencia máxima del sistema dependerá del número de transductores, y la frecuencia, del tipo de transductor.

Sus principales limitaciones son la poca potencia que suministran al medio si se comparan con otros sistemas, la variación del campo acústico dentro del baño y la dificultad en el control de la temperatura (Mulet et al., 2003a).

#### Sistemas tipo sonda

En este tipo de equipos, se utiliza una sonda metálica para aplicar al medio líquido la vibración generada en el transductor. La potencia aplicada dependerá de la amplitud de vibración en la punta de la sonda que se controlará variando la potencia eléctrica suministrada por el equipo generador/amplificador.

Tanto el diseño como la forma de la sonda tienen mucha importancia. La longitud de la misma debe de ser de media longitud de onda o múltiplo de dicha longitud. Las sondas cilíndricas se limitan a transmitir la energía acústica al medio a tratar. Sin embargo, si a lo largo de la sonda hay reducción del diámetro entonces se produce una ganancia en la amplitud de vibración (Kuttruff, 1991). Muchos sistemas se diseñan para operar con sondas intercambiables de diferentes diámetros de superficie emisora (Cárcel, 2003) (Figura 1.2.5).

El material utilizado para la fabricación de las sondas debe tener una alta resistencia a la fatiga y resistencia a la erosión que produce la cavitación en la punta de la sonda y bajas pérdidas acústicas (Cárcel, 2003).

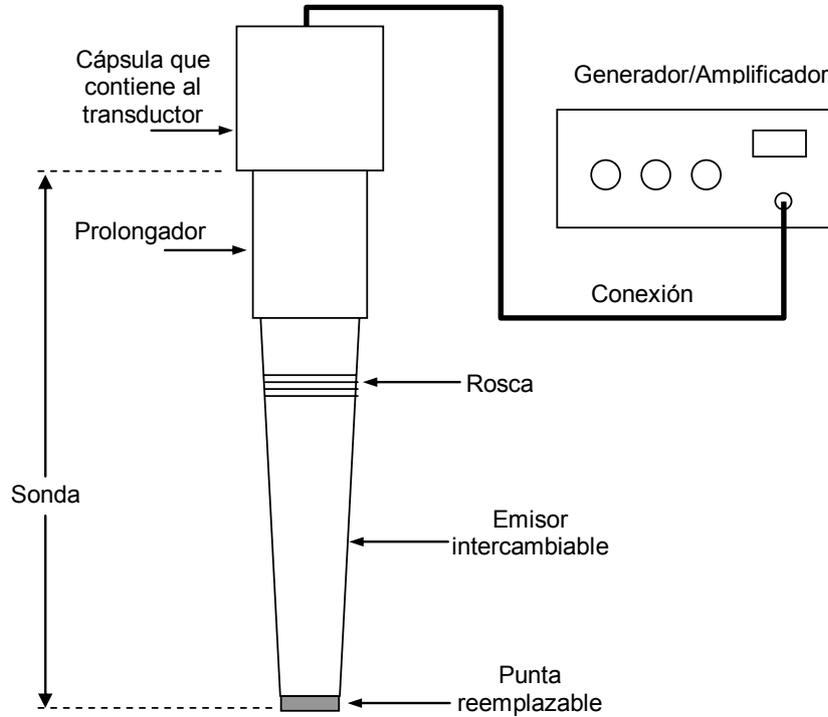


Figura 1.2.5. Sistema tipo sonda para la aplicación de ultrasonidos de potencia en medios líquidos.

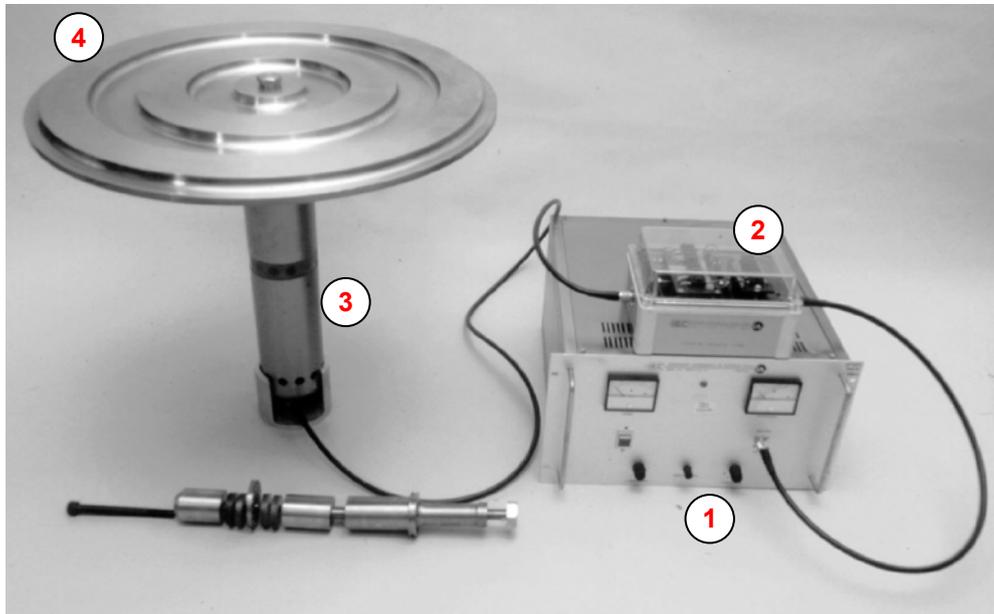
### Sistemas de aplicación de ultrasonidos en medios gaseosos

La aplicación de ultrasonidos en medios gaseosos es mucho más compleja que en medios líquidos. En medios gaseosos la transmisión de energía acústica se ve muy dificultada debido a la gran diferencia de impedancias entre los sistemas emisores de ultrasonidos y los gases y la elevada absorción acústica de estos últimos. Por tanto, para obtener una eficiente transmisión de energía y producir campos acústicos de elevada intensidad es necesario conseguir una buena adaptación de impedancia entre el emisor y el aire, grandes amplitudes de vibración y una elevada concentración de energía (Gallego-Juarez, 1999). Además, para las aplicaciones industriales es preciso que el sistema de aplicación tenga gran capacidad de potencia y una superficie radiante extensa. Los equipos

comerciales existentes en la actualidad tienen muchas dificultades para cubrir estos requisitos. Por lo tanto, es necesario buscar nuevos sistemas de aplicación que permitan un mejor acople entre el elemento vibrante y el gas.

Durante mucho tiempo los sistemas utilizados para aplicación en gases han sido sistemas aerodinámicos como silbatos y sirenas en los que la energía ultrasónica es proporcionada por una corriente de aire. Aunque las potencias que se pueden alcanzar con este tipo de generadores son altas, las eficiencias energéticas obtenidas son bajas, el sonido emitido es complejo y presentan dificultades para alcanzar frecuencias ultrasónicas (Gallego-Juarez, 1998).

Gallego-Juarez et al. (1994) desarrollaron un nuevo sistema ultrasónico tipo sonda donde el elemento emisor es una placa escalonada que irradia energía acústica al medio gaseoso (Figura 1.2.6). Este sistema posee un elevado rendimiento, capacidad de potencia y una muy alta directividad. El emisor está compuesto por una placa extensa, de perfil escalonado, que vibra flexionalmente en uno de sus modos propios y es excitada en su centro por un vibrador piezoeléctrico constituido, a su vez, por un amplificador mecánico y un transductor tipo sándwich (Figura 1.2.7). La extensa superficie de la placa aumenta la impedancia de radiación y ofrece al sistema vibrante una buena adaptación de impedancias con el aire. Los emisores planos ofrecen una pobre directividad debido a cancelaciones de fase. Sin embargo, si los elementos superficiales del radiador que vibran en contrafase a ambos lados de una línea nodal se desplazan alternativamente, según la dirección del eje acústico del radiador, en media longitud de onda de la radiación en el medio, la emisión generada por un radiador con este nuevo perfil estará en fase en todo el haz. Siguiendo un procedimiento similar es posible, con adecuados desplazamientos de las diferentes zonas del plato, alcanzar diferentes configuraciones del campo acústico. La estructura escalonada del plato permite el control de la distribución de masa a lo largo del plato para obtener modelos de vibración uniformes (Gallego-Juarez et al., 1999).

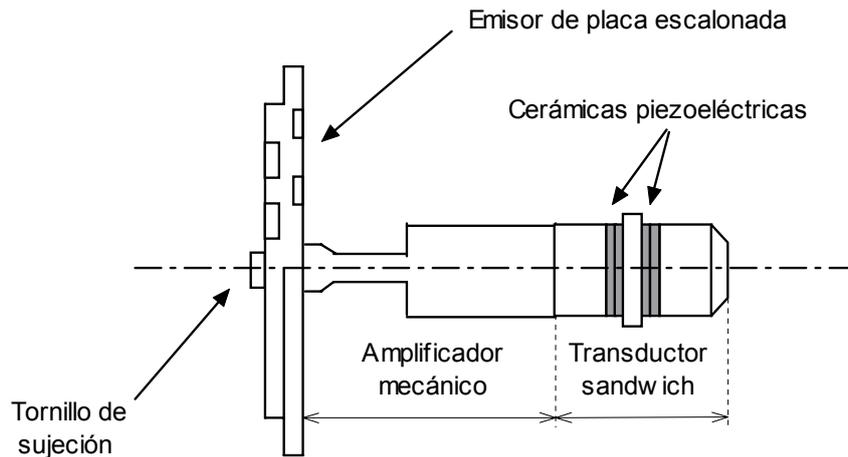


**Figura 1.2.6. Sistema de aplicación de ultrasonidos de placa radiante.** 1. Generador/Amplificador, 2. Adaptador de impedancias, 3. Transductor piezoeléctrico, 4. Emisor de placa escalonada.

Diferentes prototipos de emisores de placa escalonada han sido desarrollados para rangos de frecuencia entre 10-40 kHz y capacidad de potencia aplicada entre 100 W (plato de 20 cm de diámetro) y 1 kW (plato de 70 cm de diámetro) (Gallego-Juárez et al., 1999). También se han desarrollado emisores de superficie rectangular (De la Fuente et al., 2006). La máxima presión sonora conseguida con estos equipos ha sido de 170 dB.

Los sistemas ultrasónicos de placa escalonada se han utilizado para mejorar procesos de secado de alimentos y para evitar la formación de espumas en el llenado de latas y en reactores de fermentación (Gallego-Juarez, 1998). En cuanto a las aplicaciones en el secado de alimentos, se han realizado experiencias tanto con contacto directo entre el emisor y el alimento como sin ningún tipo de contacto.

Las dificultades existentes para la generación de ultrasonidos en medios gaseosos muestran el elevado interés científico de la búsqueda de nuevos prototipos ultrasónicos para llevar a cabo este tipo de aplicaciones.



**Figura 1.2.7. Esquema de un sistema de aplicación ultrasónico de placa radiante.**

### ***1.2.3.3. Principales efectos producidos por los ultrasonidos de potencia en el secado convectivo***

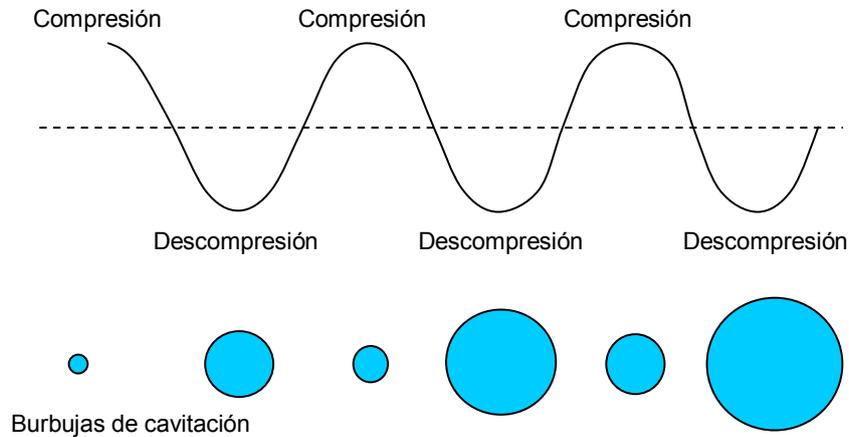
Como anteriormente se ha indicado, los ultrasonidos de potencia producen cambios en el material o en los procesos en los que son aplicados. Los efectos atribuidos a los ultrasonidos pueden ser muy diferentes, e incluso contrarios, en función del medio físico en el que estos se transmiten. Por ejemplo, los ultrasonidos se usan para separar agregados de partículas en un medio líquido o para formar agregados en medios gaseosos. El principal mecanismo responsable de los efectos de los ultrasonidos puede cambiar también en función del medio. Así, la mayoría de los efectos en medios líquidos están asociados con la cavitación, fenómeno que no es tan importante en gases o sólidos. Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, a continuación se van a exponer los principales mecanismos asociados a la aplicación de ultrasonidos de potencia que pueden

tener lugar durante el secado convectivo asistido por ultrasonidos de potencia (Gallego-Juarez, 1998).

Los ultrasonidos de potencia producen variaciones de presión en las interfaces sólido-gas que pueden influir en la velocidad de evaporación de agua. Durante la fase negativa del ciclo de presión, disminuye la presión parcial del agua en la superficie y por tanto se acelera la pérdida de la humedad de la superficie del sólido. Este fenómeno puede resultar más importante durante el periodo de secado constante ya que la superficie del material está completamente saturada de agua.

Por otro lado, la energía acústica también provoca velocidades oscilantes y microcorrientes en la interfase sólido-líquido que pueden contribuir a la disminución del espesor de la capa límite de difusión, y por tanto, reducir la resistencia externa a la transferencia de calor y materia (Arkhangel'skii y Statnikov, 1973). Los efectos de los ultrasonidos en las interfaces gas-sólido también pueden influir en la resistencia interna al transporte de materia cuando afectan a los espacios intercelulares del interior de la partícula. Dichos fenómenos serían más intensos en aquellos materiales con una amplia red de espacios intercelulares como son los productos de elevada porosidad.

Los ultrasonidos de potencia también pueden producir efectos estructurales en el material sólido. Cuando la energía ultrasónica atraviesa el sólido causa rápidas series de contracciones y expansiones alternativas. El proceso podría asimilarse a lo que ocurre cuando una esponja se aprieta y se relaja, por lo que normalmente se le conoce como "efecto esponja" (Sajas y Gorbatow, 1978; Gallego-Juárez, 1998; Mulet et al., 2003b). Este estrés alterno facilita la eliminación del agua al crearse canales microscópicos para el movimiento de las moléculas (Muralidhara et al., 1985). En materiales más densos se pueden producir microfracturas en la estructura del material (Cárcel, 2003). Lo que facilita la formación de canales microscópicos en la dirección normal a la propagación de la onda durante la fase descompresión y, en la dirección paralela, en la fase de compresión (Muralidhara et al., 1985).



**Figura 1.2.8. Formación y crecimiento de burbujas de cavitación por difusión rectificada.**

El fenómeno de cavitación en materiales sólidos es mucho menos intenso que en líquidos (Gong y Hart, 1998), aunque también podría darse ayudando de este modo a eliminar el agua más fuertemente retenida a la estructura del alimento. Las compresiones y descompresiones que provoca la onda acústica inducen a movimientos moleculares en el medio. En los ciclos de compresión las moléculas de agua líquida tienden a aproximarse mientras que en los de descompresión tienden a separarse. Si la intensidad es suficientemente elevada, las presiones negativas producidas durante la descompresión pueden vencer las fuerzas atractivas de las moléculas del líquido, lo que conlleva a la formación de una burbuja de cavitación (Mason y Cordemans, 1996). Una vez formada, la burbuja sigue creciendo por el mecanismo de difusión rectificada, caracterizado por un flujo neto de gas desde el líquido a la burbuja (Figura 1.2.8). En el ciclo de presión negativa, el flujo de gas se produce desde el líquido hacia la burbuja que se expande aumentando de tamaño. Cuando la presión es negativa, el flujo es contrario y la burbuja disminuye de tamaño. La cantidad de vapor perdido siempre es inferior al ganado, por lo que el tamaño de la burbuja crece en cada ciclo. El crecimiento de la burbuja puede terminar en la implosión de la misma, la cual conlleva una importante liberación de energía al medio y favorece la eliminación

de las moléculas de agua de la fase líquida que se encuentran fuertemente retenidas en la matriz sólida.

Por último, los ultrasonidos también producen un calentamiento del medio, aunque no tan importante como el que genera por ejemplo la aplicación de microondas. La resistencia que ofrecen las partículas de un medio a la vibración y el rozamiento entre ellas provocan la conversión de la energía acústica en calor. Esta absorción de energía puede ser especialmente importante en las interfases. La absorción de energía acústica se incrementa a medida que aumenta la frecuencia. Como se ha comentado anteriormente, el calentamiento producido por los ultrasonidos es prácticamente despreciable en medios gaseosos y puede representar una elevación de unos pocos grados al inicio del tratamiento (Mason y Lorimer, 2002). En cambio en medios líquidos, el incremento de temperatura resulta más significativo, utilizándose su medida para calcular la potencia acústica realmente aplicada en el medio (Raso et al., 1999; Mulet et al., 2003b).

#### ***1.2.3.4. Aplicaciones en procesos de transferencia de materia en medios líquidos***

Las aplicaciones ultrasónicas en sistemas sólido-líquido para acelerar procesos de transferencia de materia son mucho más frecuentes que en medios gaseosos, como consecuencia de que la aplicación de los ultrasonidos es más sencilla. El estudio pormenorizado de las aplicaciones en medios líquidos puede ser de gran ayuda para abordar aplicaciones en medios gaseosos como es el secado acústico.

Las principales aplicaciones de los ultrasonidos de potencia en medios líquidos se encuentran en el salado de carne (Cárcel, 2003) y queso (Sánchez et al., 2000), la deshidratación osmótica de frutas (Taiwo et al., 2003) y también en procesos de extracción de productos naturales tanto con disolventes convencionales (Romdhame y Gourdon, 2002; Albu et al., 2004; Stavarache et al., 2006) como con fluidos supercríticos (Riera et al., 2004; Balachandran et al., 2006;

Hu et al., 2006; Cho et al., 2006). A partir del estudio de dichos trabajos se han podido identificar algunas de las principales variables que influyen en la aplicación de ultrasonidos de potencia: intensidad acústica, frecuencia, temperatura y tipo de material.

#### Intensidad acústica

Gisbert (2001) estudió la influencia de los ultrasonidos de potencia en el salado de carne de cerdo utilizando un baño de ultrasonidos (40 kHz). La ganancia de sal no se vio afectada de forma significativa por la aplicación de ultrasonidos. Cárcel (2003) realizó experiencias similares pero utilizando tanto un baño ultrasónico (30-40 kHz) como un sistema tipo sonda (20 kHz), que permitió aplicar diferentes niveles de intensidad acústica.

Los resultados presentados por Cárcel (2003) muestran que hasta un determinado umbral de intensidad (30-40 W/cm<sup>2</sup>) no se observó influencia de los ultrasonidos en la ganancia de sal. Por encima de dicho umbral, superior al que en general proporcionan los baños comerciales, la ganancia de sal de la carne fue significativamente superior a la experimentada por las muestras saladas por métodos convencionales. Estos resultados explicarían por qué Gisbert (2001) no encontró ningún efecto en el salado de carne asistido por ultrasonidos al realizar la aplicación con un sistema de baño que probablemente produjo unos niveles acústicos inferiores al umbral necesario.

Sajas y Gorbatow (1978) establecieron que la influencia de la intensidad acústica aplicada en el salado de carne tiene un límite superior a partir del cuál el transporte de materia deja de ser dependiente de esta variable. Incluso intensidades muy elevadas podrían provocar una cavitación excesivamente violenta que podría suponer una barrera entre las fases dificultando así la transferencia de materia.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, parece ser que uno de los parámetros a tener en cuenta en las aplicaciones de los ultrasonidos de potencia

en procesos de transferencia de materia es el nivel de intensidad acústica aplicado.

### Frecuencia

Generalmente, la frecuencia más utilizada en las aplicaciones de ultrasonidos de potencia se encuentra alrededor de 20 kHz ya que la atenuación aumenta con este parámetro. Sin embargo, se han encontrado aplicaciones a frecuencias elevadas que han arrojado resultados muy interesantes.

Sajas y Gorbatow (1978) realizaron experiencias de salado de carne a diferentes frecuencias y observaron que el contenido de sal fue significativamente superior en las experiencias realizadas a frecuencias elevadas (300 a 1000 kHz) que a bajas frecuencias (20 kHz). Estos resultados coinciden con los obtenidos por Cárcel (2003) en experiencias de salado de carne a 20 kHz y 290 kHz utilizando dos sistemas diferentes tipo sonda. A pesar de la baja intensidad ultrasónica aplicada a 290 kHz, tan solo de  $4.2 \text{ W/cm}^2$ , aparecieron diferencias significativas en el contenido de sal con respecto a las experiencias de salado sin agitación de la salmuera. Este nivel de intensidad ultrasónica es inferior al umbral de intensidad necesario para que aparecieran los efectos en experiencias realizadas a 20 kHz ( $30\text{-}40 \text{ W/cm}^2$ ). Así pues, un aumento de la frecuencia supuso una aceleración de los procesos de transferencia de materia en el salado de carne sin necesidad de aplicar intensidades muy elevadas. Este fenómeno puede explicarse si se considera una influencia de la frecuencia utilizada en la sensibilidad de los materiales a la energía acústica.

Toma et al. (2001) realizaron extracción con diferentes solventes de tejidos vegetales utilizando un sistema sonda a 20 y 500 kHz. La influencia en los procesos de extracción fue mucho menor a 500 kHz, probablemente debido a la mayor atenuación a elevadas frecuencias.

### Temperatura

Simal et al. (1998c) realizaron experiencias con cubos de manzana (1 cm de lado) sumergidos en una disolución de sacarosa a diferentes niveles de

---

temperatura (40, 50, 60 y 70 °C). Se comparó la deshidratación convencional, con agitación mecánica, con la realizada en un baño de ultrasonidos (30 kHz). Tanto la ganancia de solutos como la pérdida de agua fueron mayores en las experiencias donde se aplicaron ultrasonidos, aunque las diferencias entre tratamientos disminuyeron a medida que aumentó la temperatura. De aquí se extrae que, otro de los parámetros importantes en la aplicación de los ultrasonidos es la temperatura a la que se realice el tratamiento.

#### Tipo de material

Sánchez et al. (1999) realizaron experiencias de salado de queso tipo Mahón utilizando muestras cilíndricas (radio 17 mm y altura 30 mm) a 15 °C en condiciones estáticas, con agitación mecánica y utilizando un baño de ultrasonidos (30 kHz). La aplicación de ultrasonidos incrementó tanto la pérdida de agua como la ganancia de sal respecto a los tratamientos realizados en condiciones estáticas y de agitación. Estos resultados difieren de los obtenidos por Cárcel (2003) en el salado de carne donde los niveles de intensidad acústica proporcionados por un baño de ultrasonidos similar no fueron suficientes para afectar al proceso. La distinta estructura de los materiales puede influir en su sensibilidad a la energía acústica. Este hecho explicaría por qué ante los mismos niveles de energía acústica el salado de queso se vio influenciado de forma significativa por la aplicación ultrasónica mientras que no se apreció ningún efecto en el caso de la carne.

Cárcel et al. (2007) realizaron experiencias de deshidratación osmótica de láminas de manzana (3.0x3.0x0.5 cm) a temperatura constante (30 °C) en condiciones estáticas, de agitación y asistidas por ultrasonidos. Las experiencias de ultrasonidos de potencia se realizaron con un sistema tipo sonda (20 kHz) y se aplicaron diferentes niveles de intensidad ultrasónica. Los efectos de los ultrasonidos aparecieron a partir de un umbral de intensidad ultrasónica aplicado ( $8.0 \text{ W/cm}^2$ ) inferior al obtenido por este mismo autor (Cárcel, 2003) en el salado de carne ( $30\text{-}40 \text{ W/cm}^2$ ). De nuevo se pone de manifiesto la influencia de la materia prima en los efectos debidos a la aplicación de ultrasonidos. La estructura

---

porosa de la manzana, con grandes espacios intercelulares, facilitaría la acción de los ultrasonidos. Esta influencia que es mucho más difícil que aparezca en la carne, de estructura fibrosa y sin la presencia de poros (Mulet et al., 2003b).

Las referencias bibliográficas sobre aplicaciones de ultrasonidos de potencia en medios líquidos han permitido identificar las variables que de forma más importante influyen en dicha aplicación. Además, se ha constatado que la teoría difusional es útil para modelizar las cinéticas de transferencia de materia en este tipo de sistemas (Simal et al., 1998c; Sánchez et al., 1999; Cárcel et al., 2007; Gabaldón-Leyva et al., 2007). La modelización se ha aplicado tanto para describir la evolución del contenido de agua como el de solutos, como la sacarosa o la sal. A partir de la modelización y de los parámetros identificados, se ha podido determinar la influencia de la aplicación de los ultrasonidos de potencia en estos sistemas.

Por último, a partir del estudio de las aplicaciones de los ultrasonidos de potencia en medios líquidos también se ha desprendido la influencia que tienen los ultrasonidos en el material tratado, tal y como a continuación se muestra.

#### Influencia en el material tratado

Sánchez et al. (2001a y 2001b) estudiaron la influencia del salado acústico sobre algunos parámetros de calidad del queso Mahón. Los quesos salados en presencia de ultrasonidos presentaron un mayor contenido de ácidos grasos (Sánchez et al., 2001a) y aminoácidos libres (Sánchez et al., 2001b) durante la maduración en comparación con los salados de forma tradicional. Este incremento puede ser consecuencia de la rotura de los glóbulos grasos y de la desnaturalización de las proteínas en presencia del campo acústico. El análisis sensorial mostró que los quesos salados con ultrasonidos presentaron una mayor firmeza y aroma, y un sabor más intenso que los tradicionales (Sánchez et al., 2001a y 2001b).

Gabaldón-Leyva et al. (2007) realizaron tratamientos sólido-líquido de pimiento rojo con diferentes tipos de soluciones salinas a 25–55 °C con y sin

aplicación de ultrasonidos de potencia. La ganancia de solutos aumentó de forma significativa debido a la aplicación de ultrasonidos de potencia, probablemente debido al aumento de la permeabilidad de las paredes celulares como consecuencia de los efectos asociados a la energía acústica. Este hecho quedó evidenciado por la menor firmeza que presentaron las muestras tratadas con ultrasonidos.

Toma et al. (2001) mostraron el diferente efecto de los ultrasonidos en los tejidos vegetales durante la extracción con diferentes solventes a partir de imágenes tomadas en un microscopio óptico (100x). Las experiencias fueron realizadas con un sistema tipo sonda a 20 kHz. Los efectos ocasionados en el sólido fueron distintos para los diferentes tejidos. Así, en hojas de menta los ultrasonidos degradaron prácticamente la totalidad de las glándulas de almacenamiento del aceite mientras que en pétalos de caléndula el efecto de los ultrasonidos se centró en los pelos colocados en el fondo de los pétalos, que resultaron fuertemente degradados.

La aplicación de ultrasonidos de potencia en procesos de extracción constituye un campo de elevado interés científico. Las violentas implosiones producidas por la cavitación pueden contribuir a la disrupción celular y facilitar la extracción de componentes celulares, lo que puede influir tanto en el rendimiento de la operación como en la composición del extracto.

La extracción de aceites esenciales a partir de dientes de ajo mediante métodos convencionales fue comparada con la extracción asistida por ultrasonidos (35 kHz) (Kimbaris et al., 2006). La aplicación de ultrasonidos influyó en la composición del extracto obtenido, tanto de forma cuantitativa como cualitativa evitando el daño térmico producido por los métodos convencionales y mejorando la calidad organoléptica del extracto. Jiménez et al. (2007) mostraron como la aplicación de ultrasonidos influyó tanto en el rendimiento de la extracción como en la calidad del aceite de oliva virgen.

Los ultrasonidos también han sido utilizados como pretratamiento para la posterior extracción acuosa-enzimática de aceites de semillas de almendra y albaricoque (Sharma y Gupta, 2006). Imágenes tomadas utilizando un microscopio electrónico de barrido mostraron las microroturas producidas por los ultrasonidos en la superficie del material, que explicarían tanto el aumento del rendimiento del proceso de extracción como la disminución del tiempo de tratamiento.

Los trabajos anteriormente presentados sobre la aplicación de ultrasonidos en medios líquidos son de mucha utilidad de cara a abordar aplicaciones ultrasónicas en medios gaseosos ya que han puesto de manifiesto algunas de las principales variables que pueden afectar a la aplicación ultrasónica.

#### ***1.2.3.5. Secado asistido por ultrasonidos de potencia***

Como se ha tratado anteriormente, la aplicación de ultrasonidos de potencia en medio gaseosos es complicada debido la gran diferencia de impedancias entre los sistemas emisores de ultrasonidos y los gases y la elevada atenuación de este medio. Esta es la principal razón por la que el número de aplicaciones en medios gaseosos es mucho menor que en medios líquidos.

Dentro de las aplicaciones ultrasónicas en medios gaseosos se encuentra el secado acústico (Borisov y Ginkina, 1973). Las primeras referencias sobre secado asistido por ultrasonidos son anteriores a la primera mitad del siglo XX (Borisov y Gynkina, 1973). Aunque el interés por la tecnología no creció hasta la publicación de una serie de artículos por Boucher (1959) sobre el secado asistido por ultrasonidos de materiales sensibles al calor. A pesar de este interés, el desarrollo de la tecnología se ha visto enormemente dificultado por la complejidad de la aplicación de los ultrasonidos en medios gaseosos (Muralidhara et al., 1985; Ensminger, 1988).

Borisov y Ginkina (1973) presentaron una recopilación de los trabajos realizados en la Academia de Ciencias de la URSS sobre secado acústico. En estos trabajos, se presentaron los posibles efectos de los ultrasonidos para

acelerar la pérdida de agua durante el secado, mostraron la influencia de algunas variables del proceso, diseñaron prototipos industriales y realizaron experiencias en diversos materiales utilizando transductores ultrasónicos operados por fluidos. Posteriormente, Da Mota y Palau (1999) utilizaron un sistema tipo sirena para el secado acústico de cebolla. La velocidad de la pérdida de agua fue más rápida en las experiencias sonicadas que en las secadas tradicionalmente con métodos convectivos. Uno de los problemas de esta aplicación fue que las experiencias se realizaron en el rango de audición humano (1.6 y 3.2 kHz), de la misma manera que los trabajos presentados por Borisov y Ginkina (1973).



**Figura 1.2.9. Aplicación de ultrasonidos por contacto directo entre el emisor y el alimento.**

Al igual que ocurre en los procesos de transferencia de materia en medios líquidos, la frecuencia influye en la aplicación de los ultrasonidos durante el secado (Borisov y Ginkina, 1973). A medida que se incrementa la frecuencia, la transmisión de energía acústica por el aire se ve dificultada ya que aumenta la absorción del medio, de ahí que los efectos de los ultrasonidos sean más intensos a medida que disminuye la frecuencia. Sin embargo, por debajo de 20 kHz (límite

de audición humano) el impacto sonoro puede ser muy importante en los operarios dificultando la aplicación de esta tecnología.

Nakagawa et al. (1996) utilizaron una placa vibrante (19.5 kHz) para irradiar energía acústica sobre muestras de surimi colocadas en una cámara de secado. Realizaron pruebas a velocidades del aire comprendidas entre 1.6 y 2.8 m/s y diferentes temperaturas 20, 30, 40 y 50 °C. También realizaron experiencias variando el nivel de intensidad acústica (de 141.2 a 155.5 dB). La aplicación de ultrasonidos incrementó la constante de velocidad de secado en todo el rango de velocidades y temperaturas de aire ensayadas. El nivel de presión acústica utilizado también influyó, a partir de 150 dB los efectos de los ultrasonidos fueron más importantes.

Gallego-Juárez et al. (1999) utilizaron un sistema de aplicación ultrasónico de placa escalonada (20 kHz) (Gallego-Juárez et al., 1994) en el secado por aire caliente de zanahoria asistido por ultrasonidos de potencia. Se realizaron experiencias siguiendo dos metodologías, sin contacto directo del plato vibrante con las muestras y con contacto directo (Figura 1.2.9). En el primer caso se realizaron experiencias a 1.3 y 3 m/s y a diferentes temperaturas 60, 90 y 115 °C en rodajas de zanahoria de 2 mm de espesor. La aplicación de ultrasonidos aceleró la pérdida de agua de las muestras durante el secado, aunque la influencia disminuyó a medida que aumentó la temperatura desapareciendo a 115 °C. El efecto de los ultrasonidos también se vio afectado por la velocidad del aire, ya que en las experiencias donde se utilizó una velocidad de 3 m/s la influencia fue mucho menor. En las experiencias realizadas con acople directo entre el elemento vibrante y las muestras, el efecto de los ultrasonidos fue mucho más intenso debido a que la transmisión de la energía acústica se produce directamente desde el elemento vibrante a la muestra, evitando la deficiente transmisión de la energía acústica por el aire. La eficiencia del sistema ultrasónico por contacto directo aumentó aplicando una ligera presión estática entre las muestras y el elemento vibrante.

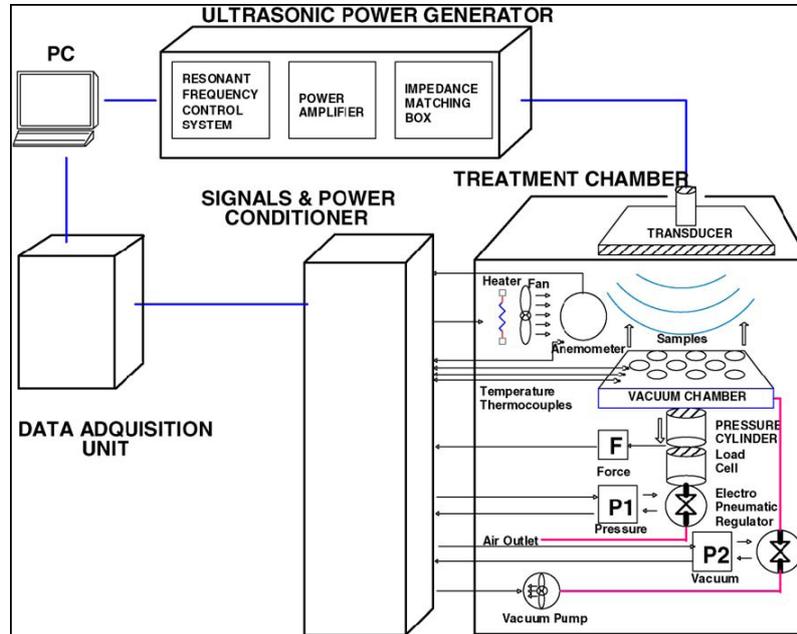


Figura 1.2.10. Esquema del secadero convectivo asistido por ultrasonidos de potencia con contacto directo y presión estática desarrollado por De la Fuente et al. (2006).

Riera et al. (2002) y De la Fuente et al. (2003) realizaron experiencias similares de secado asistido por ultrasonidos de potencia en manzana, patata, champiñón y zanahoria. Los resultados volvieron a mostrar una mayor eficiencia de la técnica por contacto directo. También se comprobó que el efecto fue más intenso a medida que aumentó la potencia ultrasónica aplicada. De la Fuente et al. (2006) han desarrollado un prototipo de secadero ultrasónico por contacto directo y completamente automatizado (Figura 1.2.10). A pesar de la elevada eficiencia de la tecnología por contacto directo, su aplicación en el secado tradicional resulta difícil. Por lo tanto, la búsqueda de nuevos prototipos ultrasónicos con una mejor adaptabilidad al secado convectivo presenta un elevado interés científico.

La aplicación de ultrasonidos de potencia también se ha utilizado como pretratamiento al secado convectivo debido a su influencia en la estructura del

producto. Jambrak et al. (2007) compararon la influencia de la sonicación de muestras de champiñón, col de Bruselas y coliflor en agua destilada utilizando un baño (40 kHz) y un sistema sonda (20 kHz) (18 °C) respecto al escaldado convencional (80 °C/ 3 min), como pretratamiento al secado convectivo (60 °C, 3 m/s). El tiempo de secado disminuyó en algunas de las muestras sonicadas respecto a las escaldadas debido a la degradación de la estructura celular por la acción de los ultrasonidos, además también se redujo el posterior tiempo de rehidratación.

Como se ha podido comprobar en este apartado, las referencias bibliográficas sobre secado acústico son escasas y en algunas ocasiones de difícil acceso (Nakagawa et al., 1996). Las revisiones bibliográficas realizadas han permitido identificar algunas variables del proceso que pueden afectar al secado acústico: temperatura, velocidad del aire, nivel de intensidad ultrasónica empleado y tipo de materia prima. Resulta pues necesaria una investigación más intensa de cara a evaluar su influencia en el proceso de transferencia de materia que se da durante el secado acústico.

#### ***1.2.3.6. Otras aplicaciones en Tecnología de Alimentos***

Además de su aplicación en procesos de transferencia de materia, los ultrasonidos de potencia se han utilizado en otros campos de la tecnología de alimentos. Entre otras, destacan las aplicaciones en procesos de transferencia de calor, inactivación de microorganismos y enzimas, operaciones de limpieza, mejora de reacciones químicas, tenderización de carne, formación de emulsiones y en procesos de corte de alimentos (Javanaud, 1988; Mason et al., 1996; Cárcel et al., 1999).

Los ultrasonidos de potencia se han utilizado para mejorar **mecanismos de transferencia de calor** tanto por conducción (Fairbanks, 1979) como por convección (Sastry et al., 1989; Lima y Sastry., 1990; Cárcel et al., 2002). El efecto de los ultrasonidos se ha mostrado más intenso en medios líquidos que en gases

(Fairbanks y Otsuka, 1977). Dentro de este campo resultan especialmente interesantes las aplicaciones en procesos de congelación y descongelación de alimentos (Zheng y Sun, 2006). Li y Sun (2002) estudiaron la aplicación de ultrasonidos en la congelación de patatas por inmersión. El cambio de fase fue más rápido en presencia de un campo acústico y fue aumentando hasta un determinado umbral de potencia ultrasónica aplicada, a partir del cuál, el incremento de temperatura provocado por los ultrasonidos fue significativo y dificultó la congelación. La estructura celular de las muestras tratadas con ultrasonidos fue mejor, probablemente debido al rápido enfriamiento (Sun y Li, 2003). También puede deberse a la presencia de cristales de hielo de menor tamaño como consecuencia del mayor número de puntos de nucleación por la presencia de burbujas de cavitación y la rotura de los cristales más grandes por el efecto de la vibración (Zheng y Sun, 2006).

En la bibliografía aparecen numerosas referencias sobre la aplicación de ultrasonidos de potencia para la **inactivación de microorganismos y enzimas** (Ordóñez et al., 1987). La aplicación se puede realizar en combinación con tratamientos térmicos (termoultrasonicación) (Wrigley y Llorca, 1992; Raviyan et al., 2005; Ugarte-Romero et al., 2006), presiones moderadas (manosonicación) (Burgos et al., 1994; Álvarez et al., 2006) y tratamientos térmicos más presión (manotermosonicación) (Vercet et al., 2002). Sin embargo, y a pesar de utilizarse como técnicas de inactivación de microorganismos, los ultrasonidos aplicados a potencias moderadas pueden utilizarse para la estimulación de células vivas (Mason, 1998).

Posiblemente una de las aplicaciones más antiguas y extendidas de los ultrasonidos de potencia ha sido su utilización en **procesos de limpieza** (Quartly-Watson, 1998). Los baños de ultrasonidos se encuentran en todos los laboratorios y se pueden encontrar equipos comerciales para la eliminación de la placa bacteriana de los dientes. Los ultrasonidos son particularmente útiles en la limpieza de superficies (Mason, 1998). La cavitación asimétrica que se produce en la superficie de los materiales por la aplicación de los ultrasonidos, genera unas

ráfagas de líquido a alta presión contra las superficies sólidas. El efecto es similar al que produciría un chorro de agua a elevada presión (Cárcel, 2003). Se han utilizado para la limpieza de la piel en canales de aves (Lillard, 1994), frutas (Seymour et al., 2002) y vegetales (Ajlouni et al., 2006).

La sonoquímica es el área de conocimiento en la que se aplican ultrasonidos de potencia para mejorar la cinética de **reacciones químicas** (Senapati, 1991; Abismaïl et al., 1999; Cravotto et al., 2005). Esta tecnología ha sido desarrollada a partir de los años 80 del siglo pasado y actualmente presenta un gran auge. Particularmente interesantes resultan las aplicaciones de los ultrasonidos dentro del campo de los aceites vegetales, como por ejemplo destaca la mejora de reacciones de hidrogenación (Moulton et al., 1987; Wan et al., 1992), transesterificación para la producción de biodiésel (Stavarache et al. 2005), desgomado (Moulton y Mounts, 1990), digestión para el posterior análisis de cobre y nitrógeno total (Chemat et al., 2004c) y saponificación (Bhatkhande y Samant, 1998; Entezari y Keshavarzi, 2001). La aplicación de ultrasonidos en aceites comestibles debe realizarse con precaución por la posible aparición de componentes aromáticos no deseados (Chemat et al., 2004a) y el cambio de la fracción lipídica (Chemat et al., 2004b). La producción de látex también puede mejorarse por la aplicación de ultrasonidos (Keat Ooi y Biggs, 2000). Los ultrasonidos también pueden afectar a reacciones biológicas. Toba et al. (1990) desarrollaron un método para la producción de leche fermentada con lactosa hidrolizada con la aplicación de ultrasonidos.

Sajas y Gorbatow (1978) aplicaron ultrasonidos de potencia para la **tenderización de carne** con el objetivo de comparar con los métodos mecánicos tradicionalmente utilizados. Posteriormente Loop y Weber (2005) compararon varios métodos de tenderización de carne, entre los que destacaron de forma positiva los ultrasonidos de potencia. La vibración ultrasónica produce la rotura del tejido muscular y del tejido conjuntivo (Jayasooriya et al., 2004), con la consiguiente mejora de la textura de la carne. Los ultrasonidos pueden influir tanto en la estructura de las miofibrillas como en el incremento de la actividad

proteolítica de los enzimas. Resultados contrarios han sido mostrados en otros trabajos (Pohlman et al., 1997; Lying et al., 1998; Got et al., 1999), en los que no se apreció ningún efecto de los ultrasonidos en la textura de la carne. La diferente forma de aplicación de los ultrasonidos así como el nivel de potencia acústica utilizada podrían ser las razones de los diferentes resultados encontrados en la bibliografía.

El colapso de una burbuja de cavitación en la interfase entre dos líquidos inmiscibles puede provocar el mezclado de ambas fases y por tanto la formación de una **emulsión** (Mason, 1998). Las emulsiones generadas por la aplicación de ultrasonidos son frecuentemente más estables que las producidas por métodos convencionales como por ejemplo los Ultra-Turrax (Abismaïl et al., 1999) debido al menor tamaño de las gotas (Absmaïl et al., 2000). Transductores tipo silbato pueden ser instalados en línea para la producción de emulsiones tipo ketchup o mayonesa con rendimientos de hasta 12000 litros por hora. También se han utilizado para la producción de quesos (Gaffney, 1996) y salchichas (Sajas y Gorbатов, 1978). La elevada flexibilidad de la tecnología ultrasónica ha permitido su uso para la separación de una de las fases de una emulsión. Así, Stack et al. (2005) eliminaron la grasa de una emulsión de aceite en agua.

Los **métodos de corte ultrasónicos** son otra de las muy diversas aplicaciones de los ultrasonidos de potencia en tecnología de alimentos. Esta tecnología ha sido desarrollada a partir de los años 90 y actualmente presenta un gran desarrollo (Lucas et al., 2006; Cardoni et al., 2006). El corte ultrasónico usa cuchillas que vibran a 20 kHz. La acción de corte es una combinación del afilado perfil de la cuchilla y de su movimiento de vibración (Rawson, 1998). El corte ultrasónico presenta un gran número de ventajas frente a los métodos de corte tradicionales. Especialmente interesantes resultan su fácil automatización, calidad del corte, la no destrucción del producto y la gran flexibilidad.

### **1.3. CONCLUSIONES**

De la revisión bibliográfica realizada se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Los procesos de deshidratación se pueden considerar como etapas muy utilizadas en el procesado de algunos alimentos.
- La transferencia de agua en el proceso de secado puede estar controlada por la resistencia de la fase externa o de la fase interna o por ambas simultáneamente.
- La actividad de agua es uno de los parámetros más utilizados para determinar la estabilidad de un alimento. La relación entre actividad de agua y contenido de humedad de equilibrio a temperatura constante se establece mediante la isoterma de sorción.
- La isoterma de sorción es muy útil en los procesos de secado ya que permite estimar la humedad de equilibrio del producto con el aire de secado así como la energía requerida para la deshidratación.
- El conocimiento de las isotermas de sorción resulta necesario cuando se aborda el estudio del proceso de secado de un producto.
- La modelización de las isotermas de sorción es un paso previo necesario para poder aplicarlas en la modelización posterior de las cinéticas de secado. Debido a la complejidad de los alimentos, no es posible establecer a priori si existe algún modelo que ajuste bien en cualquier producto y en cualquier rango de humedad/actividad de agua. Así, cuando se aborda la modelización de un producto no estudiado previamente, resulta imprescindible evaluar la capacidad de ajuste de diferentes modelos para elegir el más adecuado.

- La modelización matemática de procesos constituye una herramienta básica, que permite estimar la evolución de un proceso.
- Existen diferentes teorías que intentan explicar el movimiento del agua en el interior del sólido. De entre ellas, la más frecuentemente utilizada para la modelización del proceso de secado es la teoría difusional.
- En función del objetivo de la modelización se pueden plantear modelos difusionales con diferentes grados de complejidad en la resolución. Esto permite evaluar la relación entre el esfuerzo requerido en la modelización y los resultados obtenidos para, de esta manera, realizar la selección del modelo más oportuno.
- Los modelos empíricos no buscan explicar los procesos. Su único objetivo es la descripción y la identificación de las variables más relevantes en cada caso. Los modelos empíricos pueden ser muy útiles para aplicaciones industriales o para describir de manera sencilla fenómenos complejos.
- Además de considerarse como una herramienta para predecir el comportamiento de los procesos de secado, muy útil de cara a la optimización y/o el control de procesos, la modelización constituye una herramienta muy poderosa para evaluar la introducción de una nueva tecnología en un proceso de secado.
- El secado convectivo presenta actualmente algunas limitaciones, entre las que se encuentran principalmente la baja velocidad del proceso y la pérdida de calidad del producto durante el secado. La velocidad de secado es especialmente baja durante el periodo de velocidad decreciente y este factor es especialmente limitante cuando se trabaja a bajas temperaturas, como en la liofilización a presión atmosférica.

- La liofilización a presión atmosférica permite obtener productos de una calidad similar a los obtenidos con la liofilización a vacío con unos costes de producción muy inferiores.
- La aplicación de nuevas tecnologías de manera complementaria al secado convectivo puede solventar alguna de las limitaciones del mismo. Entre estas tecnologías cabe destacar las microondas, la radio frecuencia, la radiación infrarroja y los ultrasonidos de potencia.
- A diferencia de otras tecnologías los ultrasonidos de potencia no producen un calentamiento significativo del material. Este bajo efecto térmico favorece su aplicación en el secado de materiales sensibles al calor o en procesos de secado que utilizan bajas temperaturas, como la liofilización a presión atmosférica.
- Los ultrasonidos de potencia, también conocidos como de alta intensidad, se caracterizan por aplicarse a una frecuencia comprendida entre 20 y 100 kHz y utilizan intensidades superiores a  $1 \text{ W/cm}^2$ . Los ultrasonidos de potencia pueden producir cambios en los materiales o afectar a los procesos.
- En medios gaseosos, la transmisión de energía acústica se ve muy dificultada debido a la gran diferencia de impedancias entre los sistemas emisores de ultrasonidos y los gases y a la elevada absorción acústica de este medio. Por tanto, es necesario buscar nuevos sistemas de aplicación que permitan un mejor acople entre el elemento vibrante y el gas.
- Los efectos que producen los ultrasonidos de potencia sobre los medios en que se aplican pueden influir en los procesos de transferencia de materia en sistemas sólido/líquido y sólido/gas. La influencia puede darse tanto en la parte del fluido (resistencia externa) como en la parte del sólido (resistencia interna).

- Los efectos de la aplicación de ultrasonidos de potencia en procesos de transferencia de materia en sistemas sólido-líquido están influenciados por una serie de variables, entre otras, por el nivel de intensidad acústica aplicado, la frecuencia, temperatura o el tipo de material.
- Las aplicaciones de ultrasonidos de potencia en procesos de transferencia de materia en sistemas sólido-gas, como es el secado acústico, son mucho menos frecuentes que en medios sólido-líquido.
- Las primeras aplicaciones de ultrasonidos de potencia en el secado acústico utilizaron transductores operados mediante fluidos, que trabajaban generalmente por debajo del rango de audición humano (20 kHz).
- Los sistemas de aplicación de placa escalonada se han utilizado para el secado asistido por ultrasonidos tanto con contacto directo entre el emisor y el alimento, como sin ningún tipo de contacto.
- La aplicación de ultrasonidos por contacto directo entre emisor y alimento se ha mostrado muy eficaz para acelerar los procesos de secado, aumentando el efecto si se aplica presión estática. A pesar de la eficiencia de esta técnica, su aplicación a los procesos de secado tradicionales resulta difícil. Por lo tanto, la búsqueda de nuevos prototipos ultrasónicos, con una mejor adaptabilidad, presenta un elevado interés científico-técnico.
- Los trabajos realizados hasta el momento muestran como algunas variables del proceso pueden afectar al secado acústico, especialmente temperatura y velocidad del aire, nivel de intensidad ultrasónica empleado y tipo de materia prima. Aunque es necesario una investigación más intensa de cara a evaluar su influencia en el proceso de transferencia de materia que se da durante el secado acústico.



## **2. OBJETIVOS**

Tal y como se desprende de la revisión bibliográfica realizada, el secado convectivo es una operación muy utilizada, pero que presenta ciertas limitaciones. Entre éstas, cabe destacar la baja velocidad del proceso, que es especialmente importante durante el periodo de secado de velocidad decreciente y al trabajar a bajas temperaturas, como sería el caso de la liofilización a presión atmosférica.

Se ha visto que, entre las técnicas que se pueden utilizar para aumentar la velocidad de secado, se encuentran los ultrasonidos de potencia. Una de las características de esta tecnología es que no produce un calentamiento significativo del material, lo que favorece su aplicación en el secado de materiales sensibles al calor o en procesos de secado a bajas temperaturas.

El principal el objetivo de este trabajo consistió en determinar el efecto de los ultrasonidos de potencia en procesos de secado convectivo estableciendo la influencia de las principales variables del proceso. Para la consecución de este objetivo principal se plantearon los siguientes objetivos particulares:

- Adaptar un secadero convectivo convencional para la aplicación de ultrasonidos de potencia.
- Modelizar las cinéticas de secado, tanto con modelos teóricos como empíricos, para cuantificar la influencia de los ultrasonidos de potencia en el proceso de transferencia de materia.
- Determinar la influencia de la velocidad del aire en el secado asistido por ultrasonidos de potencia.
- Determinar la influencia de la temperatura del aire en el secado asistido por ultrasonidos de potencia.
- Determinar la influencia de la potencia ultrasónica aplicada en el secado asistido por ultrasonidos de potencia.

---

**OBJETIVOS**

- Determinar la influencia de la carga másica utilizada en el secado asistido por ultrasonidos de potencia.
- Determinar la influencia de la materia prima en los efectos de los ultrasonidos de potencia durante el secado.
- Establecer la influencia de la liofilización a presión atmosférica en la calidad del bacalao.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. MATERIAS PRIMAS

Se realizaron experiencias de secado con diferentes tipos de materias primas con el objeto de evaluar la influencia de esta variable tanto en el secado convencional como en el secado acústico. Como materia prima base se escogió a la zanahoria, ya que es un producto en el que se ha estudiado el secado convectivo en profundidad. Además, se han realizado experiencias con otros productos que presentan un elevado interés en el área mediterránea como son el albaricoque, la corteza de limón y el caqui.

##### 3.1.1. Zanahoria

Las zanahorias (*Daucus Carota* var. Nantesa) utilizadas en este trabajo, envasadas en bolsas plásticas de 5 kg y provenientes de Andalucía, fueron adquiridas en un mercado local de Valencia (España). Las zanahorias presentaron un diámetro máximo comprendido entre 32 y 42 mm y un peso medio de  $108.5 \pm 22.6$  g. Antes de las experiencias de secado, las zanahorias fueron lavadas, secadas superficialmente y almacenadas en bolsas de 4 unidades en condiciones de refrigeración ( $4 \pm 1$  °C).

Para realizar las experiencias de secado, las zanahorias se cortaron en forma de cubos utilizando el dispositivo que se muestra en la Figura 3.1.1.



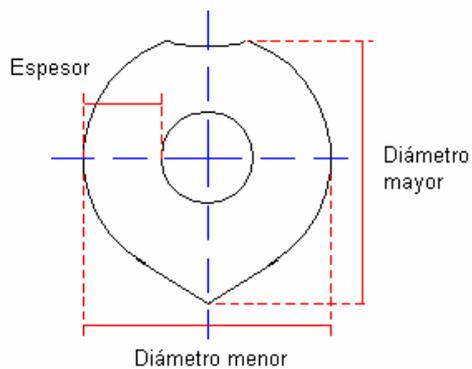
**Figura 3.1.1. Dispositivo para el corte de la zanahoria en forma de cubos (8.5 mm de lado).**

Se prepararon cubos de 8.5 mm y de 17 mm de lado, simplemente variando la separación entre cuchillas del dispositivo de corte. Una vez cortados los cubos, se envolvieron con film plástico y se almacenaron en condiciones de refrigeración ( $4\pm 1$  °C) hasta su procesado. El tiempo entre el corte de la muestras y el inicio del secado nunca superó las 24 h.

### **3.1.2. Albaricoque**

Los albaricoques (*Prunus armeniaca* var. Bulida) utilizados en este trabajo fueron recolectados de forma mecánica en Hellín (Albacete) y en el mismo día transportados al Departamento de Tecnología de Alimentos de la UPV. Se almacenaron en condiciones de refrigeración a ( $4\pm 1$  °C) hasta su selección y posterior procesado.

Los albaricoques se clasificaron en 3 grupos en función de su diámetro menor (Figura 3.1.2) con objeto de homogenizar las muestras. Las experiencias de secado se realizaron únicamente con los albaricoques del grupo 2.



**CLASIFICACIÓN ALBARICOQUES**

- Grupo 1: diámetro menor < 4 cm
- Grupo 2: 4 cm < diámetro menor < 4.5 cm
- Grupo 3: diámetro menor > 4.5 cm

Figura 3.1.2. Esquema de la sección de un albaricoque. Dimensiones características.

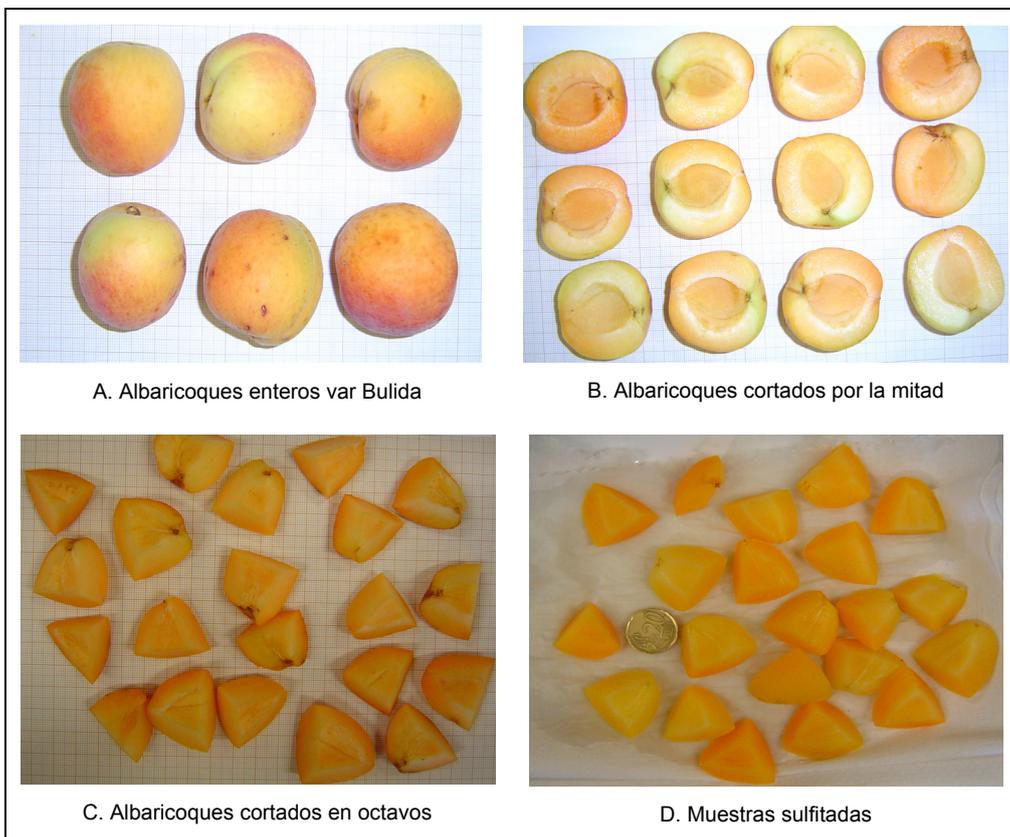


Figura 3.1.3. Preparación de los albaricoques para las experiencias de secado.

Los albaricoques seleccionados (grupo 2) presentaron un peso medio de  $39.2\pm 3.7$  g, un peso de hueso de  $3.0\pm 0.4$  g, un diámetro mayor de  $4.2\pm 0.2$  cm, un diámetro menor de  $4.1\pm 0.1$  cm y un espesor de pulpa de  $1.0\pm 0.1$  cm. También se midió el contenido de sólidos solubles siguiendo la siguiente metodología: 10 g de muestra junto con 50 mL de agua destilada se homogenizaron con un Ultra-Turrax (T25 basic, IKA-WERKE, Staufen, Alemania) durante 2.5 minutos a una velocidad de giro de  $16.000\text{ min}^{-1}$ . La disolución resultante se midió con un refractómetro (Zuzi Abbe Mod. 325, Auxilab, Berriáin, España) a una temperatura de  $20\pm 2$  °C. La concentración media de azúcares en los albaricoques fue de  $11.60\pm 0.25$  °Brix.

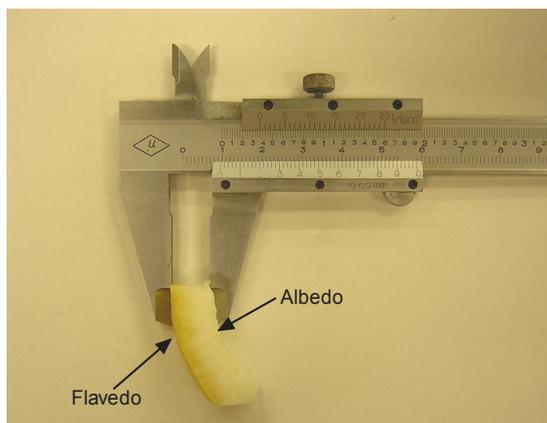
Los albaricoques se cortaron en octavos para la realización de las experiencias de secado (Figura 3.1.3). Los octavos de albaricoque fueron sulfitados para evitar reacciones de pardeamiento durante el secado. El sulfitado también sirvió para evitar que éstos se adhirieran a las paredes de la cámara de secado. A continuación se describe el procedimiento llevado a cabo para el sulfitado de los albaricoques (Miranda, 2003):

1. Inmersión de los albaricoques en una disolución de metabisulfito potásico al 3 % p/v, a 45 °C y durante 35 minutos.
2. Inmersión en una disolución de ácido acético al 1 % p/v, a 25 °C durante 5 minutos.
3. Secado superficial con papel.
4. Almacenamiento en recipientes herméticos en condiciones de refrigeración ( $4\pm 1$  °C) hasta su procesado (un tiempo mínimo de 12 horas y máximo de 24), con el objetivo de conseguir una buena distribución del metabisulfito en la muestra.

Antes de empezar las experiencias de secado los albaricoques se retiraron de los recipientes herméticos y se envolvieron con film plástico.

### 3.1.3. Corteza de Limón

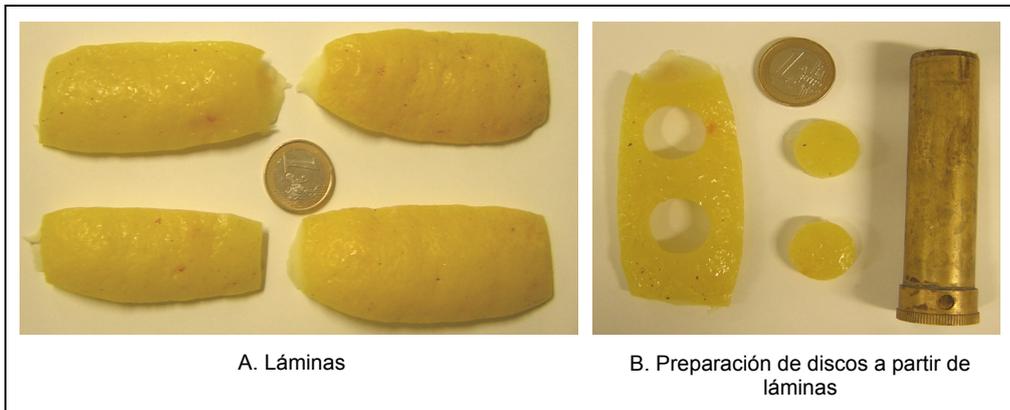
Los limones (*Citrus limon* var. Fino) utilizados en este trabajo fueron recolectados en Jávea (Alicante, España) en un estado de madurez avanzado. Los limones enteros fueron lavados, secados superficialmente y almacenados a 4 °C hasta su procesado. Las dimensiones medias de los limones fueron  $74.6 \pm 4.4$  mm de diámetro menor y  $90.1 \pm 6.8$  mm de diámetro mayor, mientras que el peso medio fue de  $220.7 \pm 22.2$  g. La corteza representó el  $41 \pm 1$  % del peso total del limón, al albedo le correspondió el  $42 \pm 3$  % del peso de la corteza, mientras al flavedo el  $58 \pm 3$  %. El espesor medio de la corteza fue de  $9.9 \pm 1.1$  mm (Figura 3.1.4) (lote 1) y de  $7.0 \pm 1.4$  mm (lote 2).



**Figura 3.1.4. Detalle de la corteza de limón.**

La corteza se separó de la pulpa con ayuda de un cuchillo y se procedió a la preparación de las muestras para las experiencias de secado. Se realizaron experiencias con láminas de corteza de limón de anchura  $3.5 \pm 0.5$  cm y longitud  $8.1 \pm 0.7$  cm, simulando las obtenidas cuando se pela de forma manual un limón (Figura 3.1.5) (lote 2). También se realizaron experiencias con muestras en forma de discos de 18.9 mm de diámetro tomadas con un sacabocados (Figura 3.1.5) (lote 1). Una vez preparadas las muestras, se envolvieron con film plástico y se almacenaron en condiciones de refrigeración ( $4 \pm 1$  °C) hasta su procesado. El

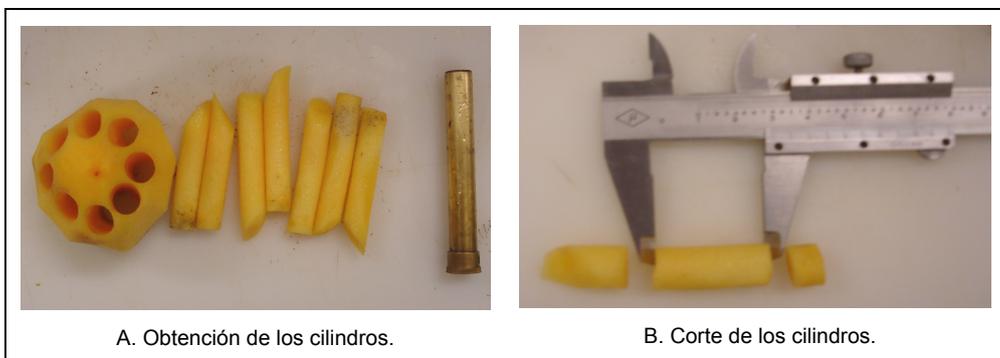
tiempo entre el corte de la muestras y el inicio del secado nunca superó las 24 horas.



**Figura 3.1.5. Tipos de muestras de corteza de limón.**

#### **3.1.4. Caqui**

Los caquis (*Diospyros kaki* var Rojo Brillante) utilizados en este trabajo procedieron de Carlet (Valencia, España). Las piezas se seleccionaron por su color uniforme y tamaño regular. El diámetro estuvo comprendido entre  $80.5 \pm 10.3$  mm. La dureza de las piezas varió entre 2.5 y 3.5  $\text{kg/cm}^2$  medida con un penetrómetro (FT327, Bishop, Heathfield, Reino Unido) provisto de una sonda de 6 mm de diámetro. Las piezas de caqui fueron lavadas, secadas superficialmente y almacenadas en condiciones de refrigeración ( $4 \pm 1$  °C) hasta la preparación de las muestras.



**Figura 3.1.6. Preparación de las muestras de caqui.**

La preparación de las muestras para las experiencias de secado comenzó con la separación de la corteza de la pulpa con la ayuda de un cuchillo. Se extrajeron muestras cilíndricas con un sacabocados y luego se cortaron los extremos, tal y como se muestra en la Figura 3.1.6. Las dimensiones finales de los cilindros fueron  $13\pm 0.1$  mm de diámetro y  $30\pm 0.1$  mm de altura (Figura 3.1.6). Se evitó tomar muestras de la parte central de la pieza, ya que la textura es diferente en esta parte de la fruta. Una vez preparados los cilindros, se envolvieron con film plástico y se almacenaron en condiciones de refrigeración ( $4\pm 1$  °C) hasta su procesado. El tiempo entre el corte de las muestras y el inicio del secado nunca superó las 24 horas.

### **3.1.5. Determinación experimental del contenido de humedad**

A continuación se detallan los procedimientos seguidos para determinar de forma experimental la humedad de las muestras de las diferentes materias primas utilizadas en este trabajo.

Para determinar el contenido de humedad en la zanahoria y la corteza de limón se siguió el procedimiento de la AOAC número 934.06 (AOAC, 1997). La preparación de las muestras consistió en su trituración utilizando un dispositivo doméstico (D56, Moulinex, Francia). Posteriormente se colocaron entre 3 y 5 g de

---

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

la muestra triturada en un pesasustancias. La muestra se distribuyó uniformemente en el fondo del pesasustancias. A continuación, los pesasustancias se introdujeron en una estufa a vacío a 70 °C hasta peso constante (24 horas). Finalmente, los pesasustancias se enfriaron en un desecador y se pesaron. A partir de la variación de peso se calculó el valor del contenido de humedad. La determinación de la humedad experimental de las muestras se realizó en todos los casos por triplicado.

El procedimiento de la AOAC para frutas con elevado contenido en azúcar, como son el caqui y los albaricoques, es similar pero además es necesario añadir 2 g de arena de mar en los pesasustancias para ayudar a la disgregación de las muestras.

### 3.2. ISOTERMAS DE SORCIÓN

Las isotermas de sorción de los distintos materiales estudiados se utilizaron para caracterizar los materiales empleados y en la modelización de las cinéticas de secado. Así, se recurrió a los resultados obtenidos por otros autores para el caso del albaricoque, la zanahoria y el caqui. En aquellos productos en los que no se encontraron referencias bibliográficas, como la corteza de limón, se determinaron de forma experimental las isotermas de sorción y posteriormente se modelizaron.

#### 3.2.1. Isotermas obtenidas a partir de referencias bibliográficas

##### 3.2.1.1. Zanahoria

Zhang et al. (1996) obtuvieron de forma experimental las isotermas de desorción de zanahoria a diferentes temperaturas 30, 40, 50, 60 °C. El modelo de GAB, según estos autores, fue el más adecuado para su modelización. Los parámetros del modelo de GAB utilizados para la modelización de las isotermas de sorción de zanahoria se muestran en la Tabla 3.2.1.

MODELO DE GAB	Valores identificados por Zhang et al. (1996)
$W = W_m \frac{C_G K_G a_w}{(1 - K_G a_w)(1 + (C_G - 1)K_G a_w)}$ <p>Donde:</p> $C_G = C_0 e^{\left(\frac{\Delta H_c}{RT}\right)}$ $K_G = K_0 e^{\left(\frac{\Delta H_k}{RT}\right)}$	<p><math>W_m = 20.80</math> (kg w/100 kg producto)</p> <p><math>C_0 = 5 \cdot 10^{-5}</math></p> <p><math>\Delta H_c = 29.28</math> kJ/mol</p> <p><math>K_0 = 0.04</math></p> <p><math>\Delta H_k = 7.02</math> kJ/mol<sup>-1</sup></p>

Tabla 3.2.1. Datos bibliográficos utilizados para la modelización de la isoterma de sorción de zanahoria (Zhang et al., 1996).

**3.2.1.2. Albaricoque**

Al igual que ocurrió con la zanahoria, la isoterma de sorción del albaricoque se obtuvo de la bibliografía.

Tsami et al. (1999) determinaron de forma experimental la isoterma de desorción de albaricoque a diferentes temperaturas (15, 30, 45 y 60 °C) en un intervalo de humedad entre 0.1-0.4 (kg w/kg ms), que correspondió con unos valores de  $a_w$  entre 0.47 y 0.82. Estos autores no abordaron la modelización matemática de los resultados experimentales que obtuvieron. Por lo tanto, para poder utilizarlos en este trabajo, se recurrió al modelo de GAB para su modelización. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.2.2.

MODELO DE GAB	Valores identificados en este trabajo
$W = W_m \frac{C_G K_G a_w}{(1 - K_G a_w)(1 + (C_G - 1)K_G a_w)}$ <p>Donde:</p> $C_G = C_0 e^{\left(\frac{\Delta H_C}{RT}\right)}$ $K_G = K_0 e^{\left(\frac{\Delta H_K}{RT}\right)}$	$W_m = 7.59$ (kg w/100 kg producto) $C_0 = 0.50$ $\Delta H_C = 3.08$ kJ/mol $K_0 = 0.79$ $\Delta H_K = 0.72$ kJ/mol  $VAR = 94.13$ % $EMR = 7.64$ %

**Tabla 3.2.2. Parámetros del modelo de GAB obtenidos de la modelización de los datos experimentales de actividad de agua y humedad presentados por Tsami et al. (1990).**

**3.2.1.3. Caqui**

Cárcel et al. (2005) determinaron de forma experimental la isoterma de sorción de caqui a las temperaturas de 10, 20, 30 y 40 °C. Estos autores encontraron una influencia de la temperatura en las isotermas de sorción de caqui y la cuantificaron con el modelo de GAB (Ec. 1.1.3) pero sin considerar el efecto de la temperatura en los parámetros C y K. De cara a extrapolar los resultados

obtenidos a otras temperaturas experimentales es necesario introducir la influencia de la temperatura en estos parámetros. Así, los resultados experimentales presentados por estos autores se modelizaron incluyendo el efecto de la temperatura en los parámetros de C y K del modelo de GAB (Tabla 3.2.3).

MODELO DE GAB	Valores identificados en este trabajo
$W = W_m \frac{C_G K_G a_w}{(1 - K_G a_w)(1 + (C_G - 1)K_G a_w)}$ <p>Donde:</p> $C_G = C_0 e^{\left(\frac{\Delta H_C}{RT}\right)}$ $K_G = K_0 e^{\left(\frac{\Delta H_K}{RT}\right)}$	<p> <math>W_m = 18.03</math> (kg w/100 kg producto)  <math>C_0 = 0.37</math>  <math>\Delta H_C = 0.30</math> kJ/mol  <math>K_0 = 0.95</math>  <math>\Delta H_K = 0.30 \times 10^{-3}</math> kJ/mol                 </p> <p>                     VAR = 96.2 %                      EMR = 21.6 %                 </p>

Tabla 3.2.3. Parámetros del modelo de GAB obtenidos de la modelización de los datos experimentales de actividad de agua y humedad presentados por Cárcel et al. (2005).

### 3.2.2. Determinación experimental de las isotermas de sorción de la corteza de limón

En la bibliografía no se encontraron referencias sobre trabajos de isotermas de sorción de corteza de limón por lo que fue necesario determinarla experimentalmente. El procedimiento utilizado para la obtención de los puntos experimentales de equilibrio entre actividad de agua y contenido de humedad consistió en varias etapas.

#### 3.2.2.1. Preparación de la muestra

Se separó la corteza de limón de la pulpa con la ayuda de un cuchillo para posteriormente ser triturada con un equipo doméstico (D56, Moulinex, Francia)

(Figura 3.2.1). La trituración permite obtener un tamaño de partícula menor que facilita el intercambio de agua con el entorno.



**Figura 3.2.1. Corteza de limón triturada.**

### **3.2.2.2. Secado de las muestras**

Las muestras fueron deshidratadas durante diferentes tiempos para conseguir un amplio intervalo de contenidos de humedad. El secado se realizó en una estufa de aire caliente a 40 °C. De cara a obtener un producto de la mayor homogeneidad posible, se colocó una capa de muestra de poco espesor en un crisol, que fue mezclada de forma periódica con una varilla metálica para evitar encostramientos. Una vez se alcanzó el tiempo de secado seleccionado, las muestras se extrajeron y se colocaron en un recipiente hermético de cristal. Transcurridas 24 horas de almacenamiento a 0 °C se procedió a la medida de la actividad de agua.

### **3.2.2.3. Determinación experimental de la actividad de agua**

La medida de la actividad de agua se realizó con tres higrómetros eléctricos (dos equipos del modelo TH200 y uno del modelo AW SPRINT TH500, NOVASINA, Air Systems for Air Treatment, Pfäffikon, Suiza) (Figura 3.2.2). Estos equipos miden la humedad relativa del aire de la cámara portamuestras a partir de

la variación de la conductividad de un sensor de cloruro de litio. Los equipos están conectados a un PC y a partir de un software específico se visualiza la evolución de la humedad relativa con el tiempo. En el equilibrio, la humedad relativa de la cámara de secado coincide con la actividad de agua del producto. El tiempo necesario para alcanzar el equilibrio nunca superó las 3 horas. Los equipos fueron calibrados a 25 °C de acuerdo con el manual del fabricante y utilizando las siguientes sales: LiCl, MgCl<sub>2</sub>, Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, NaCl, BaCl<sub>2</sub> y K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>.



**Figura 3.2.2. Equipos NOVASINA para la medida de la actividad de agua.**

La medida de la actividad de agua se realizó por triplicado utilizando un equipo diferente para cada muestra y obteniendo un valor medio de las tres medidas. La actividad de agua se midió a las temperaturas de 20, 30, 40 y 50 °C.

#### ***3.2.2.4. Determinación experimental de la humedad***

Una vez determinada la actividad de agua, las mismas muestras se utilizaron para medir el contenido medio de humedad de acuerdo a los

procedimientos descritos en el Apartado 3.1.5. Con el fin de tener una cantidad suficiente de muestra para la determinación, las tres muestras individuales se mezclaron para realizar la medida de la humedad por triplicado.

### **3.2.2.5. Modelización de la isoterma de sorción**

Para la modelización de las isotermas de sorción de la corteza de limón se recurrió tanto a modelos con base teórica, como el de GAB (Ec. 1.1.3), y a otros más empíricos, Oswin modificado (Ec. 1.1.6), Henderson modificado (Ec. 1.1.7), Halsey modificado (Ec. 1.1.8) y Ratti (Ec. 1.1.9).

### **3.2.2.6. Calor isostérico de sorción**

A partir de la ecuación de Clausius-Clapeyron (Ec. 1.1.11) puede determinarse, como ya se ha indicado anteriormente (Apartado 1.1.2.4), el calor isostérico neto de sorción. La forma más usual de ajustar dicha ecuación es representando el logaritmo neperiano de la actividad de agua frente a la inversa de la temperatura para un determinado contenido de humedad y midiendo la pendiente de la recta. Este procedimiento se ha denominado en este trabajo como método diferencial.

El método diferencial asume que el calor isostérico neto de sorción es independiente de la temperatura y requiere al menos la determinación de la isoterma a 3 temperaturas diferentes. En la bibliografía aparecen aproximaciones para el cálculo de este valor, como por ejemplo el que resulta de integrar la Ec. 1.1.11 entre dos temperaturas (Ec. 3.2.1). Con este método integral se han obtenido estimaciones del calor isostérico neto de sorción muy cercanas a las obtenidas con el método diferencial (Mulet et al., 1999a; Mulet et al., 2002a).

$$q_{sn} = R \frac{T_1 T_2}{(T_2 - T_1)} \ln \left( \frac{a_{w2}}{a_{w1}} \right) \quad (\text{Ec. 3.2.1})$$

La ecuación de Riedel (1977) (Ec. 3.2.2) se ha usado para describir la influencia de la temperatura en la actividad de agua. Combinando esta ecuación y la Ec. 3.2.1 puede obtenerse otra estimación del calor isostérico neto de sorción (Ec. 3.2.3).

$$\ln\left(\frac{a_{w2}}{a_{w1}}\right) = A_r \exp(-B_r W) \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right) \quad (\text{Ec. 3.2.2})$$

$$q_{sn} = A_r R \exp(-B_r W) \quad (\text{Ec. 3.2.3})$$

### **3.3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE SECADO**

En los siguientes apartados se describe el dispositivo utilizado en este trabajo para la realización de las experiencias de secado asistido por ultrasonidos de potencia.

#### **3.3.1. Secadero convectivo convencional**

El equipo de secado utilizado en este trabajo fue desarrollado a partir de un secadero ya existente, el cuál fue modificado para instalar el sistema de aplicación de ultrasonidos de potencia. El dispositivo descrito originalmente por Bon et al. (1994) consistía en un secadero convectivo (Figura 3.3.1) a escala de laboratorio, con control de temperatura y velocidad de aire, con flujo de aire a través del lecho de muestras y completamente automático. A continuación se detallan las diferentes partes de dicho secadero.

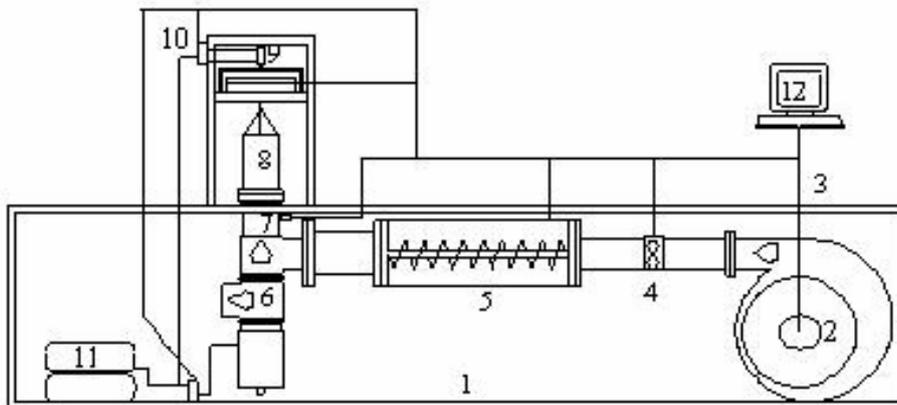
##### *Sistema de ventilación*

Compuesto por un soplante centrífugo de media presión (Figura 3.3.1-2) (COT-100, Soler & Palau, Barcelona, España) que impulsa el aire de secado, a través de las resistencias de calefacción, hacia el lecho de muestra. La velocidad del aire impulsado se controla por medio del PC que actúa sobre un variador de frecuencia (Inverter DV-551, Panasonic, EEUU). La velocidad del aire ( $\pm 0.1$  m/s) se mide mediante un anemómetro de rueda alada (Wilh. Lambrecht GmbH, Göttingen, Alemania). El anemómetro está conectado a un instrumento indicador/convertidor (TTM-104, Redlion, EEUU) que digitaliza el valor de la velocidad del aire.

##### *Sistema de calefacción*

El secadero dispone de resistencias para el calentamiento del aire de secado (Figura 3.3.1-5). El sistema presenta una potencia total de 3000 W a 220V. Un sensor Pt-100 conectado con un instrumento indicador/convertidor (TM-109,

TOHO, Japón) es utilizado para digitalizar el valor de la temperatura del aire. El sistema calefactor está controlado por un ordenador que actúa sobre un variador de intensidad (80 A, Nixa, España).



**Figura 3.3.1. Secadero convectivo Departamento Tecnología de Alimentos-UPV.** 1. Soporte metálico; 2. Soplante; 3. Conexiones con PC; 4. Anemómetro; 5. Resistencia calefactora; 6. Válvula neumática para control dirección de flujo; 7. Sensor de temperatura Pt-100; 8. Cámara de secado; 9. Balanza; 10. Elevador neumático; 11. Compresor; 12. PC de adquisición de datos y control.

Cámara de secado y sistema de pesada.

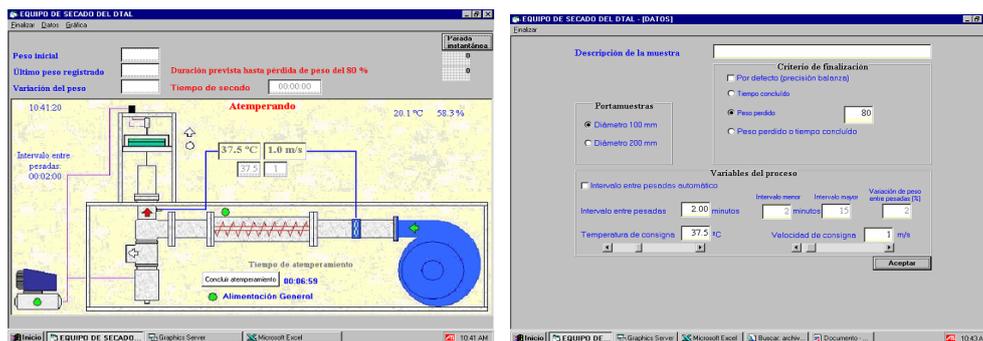
La cámara de secado está constituida por un cilindro portamuestras (Figura 3.3.1-8). Durante las experiencias de secado, el portamuestras es pesado de forma periódica mediante una balanza conectada a un ordenador (Figura 3.3.1-9) (PM4000, Mettler Toledo, EEUU). Antes de comenzar la experiencia de secado, se tara el portamuestras vacío de forma automática. De esta manera, durante el secado, se registra la evolución del peso de las muestras con el tiempo. En cada pesada, y para mantener la estabilidad de la balanza, una válvula neumática de 3 vías (Figura 3.3.1-6) desvía momentáneamente la salida del aire para evitar que éste incida sobre la misma.

### Condiciones ambientales

La temperatura y humedad relativa ambiental fueron registradas utilizando un sensor de parámetros ambientales (TG 80, Galltec+mela, Alemania) conectado a sendos instrumentos indicadores/convertidores (TM-109, TOHO, Japón).

### Sistema de control y adquisición de datos

Una aplicación informática desarrollada en Microsoft Visual Basic, se utiliza como interfaz para el control de las experiencias de secado (Figura 3.2.2). El programa permite seleccionar los valores de consigna de las variables de secado (temperatura y velocidad) y el intervalo de tiempo entre pesadas. Además, el programa genera un archivo de datos con toda la información relativa al proceso de secado, es decir, la evolución del peso de las muestras, la temperatura y velocidad del aire de secado y la temperatura y la humedad relativa ambiental.



(a)

(b)

**Figura 3.3.2. (a) Pantalla principal de la aplicación informática del secadero convectivo y (b) pantalla de selección de las variables de secado.**

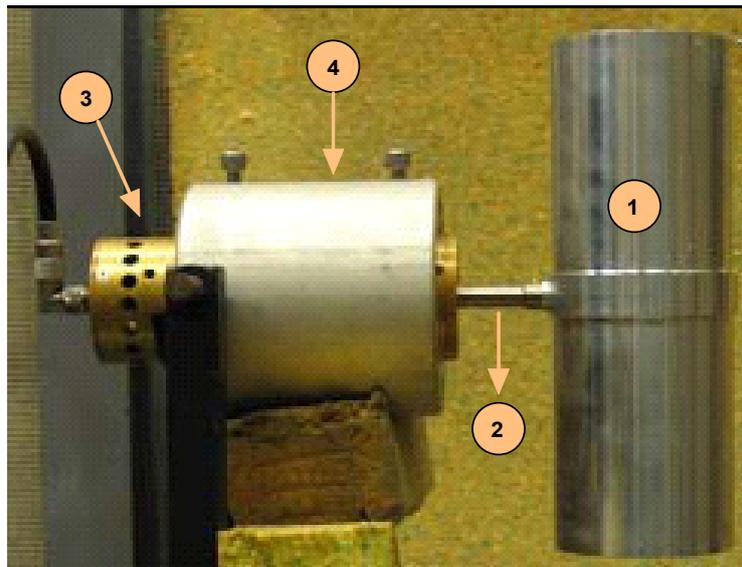
El ordenador está conectado al cuadro de control y a los distintos instrumentos indicadores/convertidores del secadero mediante una tarjeta de adquisición de datos (PCL-812PG, UCS, Wolverhampton, Reino Unido). El programa compara los valores instantáneos de temperatura y velocidad del aire de secado con los valores de consigna y, en función de la diferencia entre ambos, envía, utilizando un algoritmo de control PID, una señal a los actuadores del

control (el variador de frecuencia conectado al soplante y el variador de intensidad conectado a la resistencia). Por otra parte, el PC se comunica con la balanza a través de un puerto RS-232.

### **3.3.2. Sistema ultrasónico de potencia**

#### **3.3.2.1. Diseño del sistema de aplicación ultrasónico**

El diseño del prototipo ultrasónico se basó en la premisa de conseguir que las propias paredes de la cámara de secado fueran las encargadas de radiar la energía ultrasónica, es decir, que la cámara de secado fuera el elemento vibrante y que transmitiera la energía a las partículas presentes en su interior. El diseño y la construcción del sistema de aplicación fueron realizados por el Grupo de Ultrasonidos de Potencia del Instituto de Acústica (CSIC, Madrid, España).



**Figura 3.3.3. Sistema de aplicación de ultrasonidos de potencia.** 1. Cilindro vibrante, 2. Amplificador mecánico, 3. Transductor ultrasónico tipo sándwich, 4. Soporte.

Se diseñó un sistema de aplicación ultrasónico consistente en un cilindro, vibrando a flexión, excitado por un vibrador compuesto por un transductor tipo

sándwich y un amplificador mecánico (Figura 3.3.3) (De la Fuente et al., 2005). Su construcción se realizó a partir de los cálculos de diseño realizados en 2 dimensiones por elementos finitos utilizando el código ANSYS. Los criterios de diseño que se tuvieron en cuenta fueron los siguientes:

Material de la cámara de secado: Se seleccionó el aluminio por sus excelentes propiedades elásticas y por presentar menos problemas térmicos que otros materiales con propiedades similares.

Dimensiones: Las dimensiones del cilindro influyen en la energía radiada a las partículas. De cara a maximizar este valor, es necesario hacer resonar tanto el cilindro metálico como el volumen de aire contenido en su interior. Por ello hay que tener en cuenta:

- La *longitud, espesor y radio externo* del cilindro influirán en la resonancia del cilindro metálico. Se pretendió obtener un modo propio a la frecuencia de trabajo con un cierto número de líneas nodales en la dirección axial y ninguno en la radial para producir un efecto homogéneo en el tratamiento que recibirán las partículas a lo largo de la cámara. Así, la modelización dio como resultado un cilindro de aluminio de 120 mm de diámetro externo, 10 mm de espesor y una longitud de 310 mm. Para la frecuencia de trabajo prevista, 22.27 kHz, el modo de vibración teórico contiene 12 líneas nodales paralelas (Figura 3.3.4).

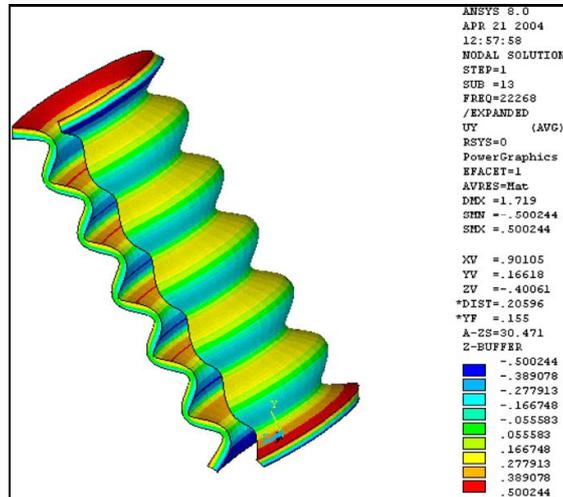
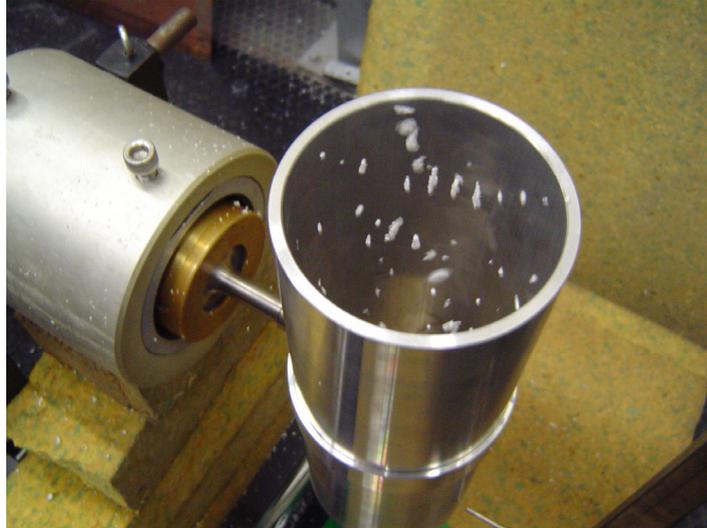


Figura 3.3.4. Simulación con elementos finitos del modo de vibración del cilindro.

- El *radio interno* del cilindro influye en la resonancia del volumen de aire. Para maximizar la energía radiada al medio, se buscó un modo del volumen de aire que coincidiera con la frecuencia de trabajo del cilindro metálico obteniéndose un diámetro interno de 100 mm. Así, se calculó mediante ANSYS el campo acústico teórico generado en su interior para una excitación de 5 micras. El resultado de la modelización fue un valor promedio del nivel de presión sonora (NPS) de 156.35 dB.

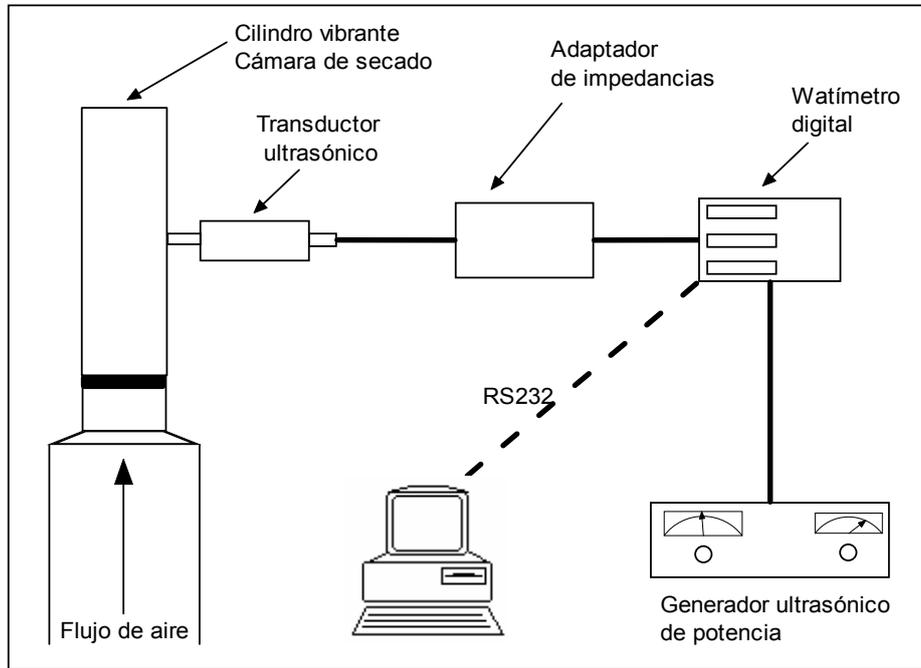
En la Figura 3.3.5 se muestra la distribución de unas partículas de poliestireno expandido en el interior del cilindro cuando se aplicó potencia al transductor (75 W). Las partículas se situaron en los planos de mínima presión acústica.



**Figura 3.3.5. Disposición de las partículas de poliestireno expandido cuando se aplica potencia al transductor.**

### **3.3.2.2. Componentes**

En la Figura 3.3.6 se muestra un esquema que recoge los principales componentes del sistema ultrasónico que fueron instalados en el secadero convectivo. El generador ultrasónico de potencia (Instituto de acústica, CSIC, España) se encarga de generar la señal eléctrica a la frecuencia de trabajo y de amplificarla. El adaptador de impedancias (Instituto de Acústica, CSIC, España) permite la optimización eléctrica del sistema ya que adapta la impedancia de salida del generador a la del sistema de aplicación ultrasónico. Este adaptador consta de un transformador con una impedancia de entrada de  $50 \Omega$  e impedancia variable entre  $200$  y  $500 \Omega$ , además de una inductancia con salida variable entre  $5$  y  $9$  mH para compensar la capacidad interelectrónica ( $C_o$ ) del prototipo ultrasónico.



**Figura 3.3.6. Principales elementos del sistema ultrasónico de potencia.**

Los distintos parámetros eléctricos de la señal ultrasónica fueron medidos con un watímetro digital (WT210, Yokogawa, Japón): frecuencia (Hz), potencia (W), intensidad (A), voltaje (V) y desfase ( $^{\circ}$ ). El watímetro se encuentra conectado a un ordenador a través de una interfase RS-232. La inclusión del watímetro en el sistema ultrasónico permite excitar al transductor a la frecuencia correcta que corresponde con el modo de las 12 líneas nodales. Si se excitara otro modo se reduciría notablemente la energía almacenada en el cilindro y si se fuera aumentando la potencia podría llegar a romperse el cilindro. Con el objetivo de encontrar posibles deficiencias en el funcionamiento del transductor durante las experiencias de secado, se realizó una aplicación para la visualización y adquisición de los parámetros eléctricos de la señal que se utiliza para excitar el transductor. Dicha aplicación se realizó utilizando el lenguaje de programación de LabVIEW<sup>TM</sup> (National Instruments) (Figura 3.3.7).

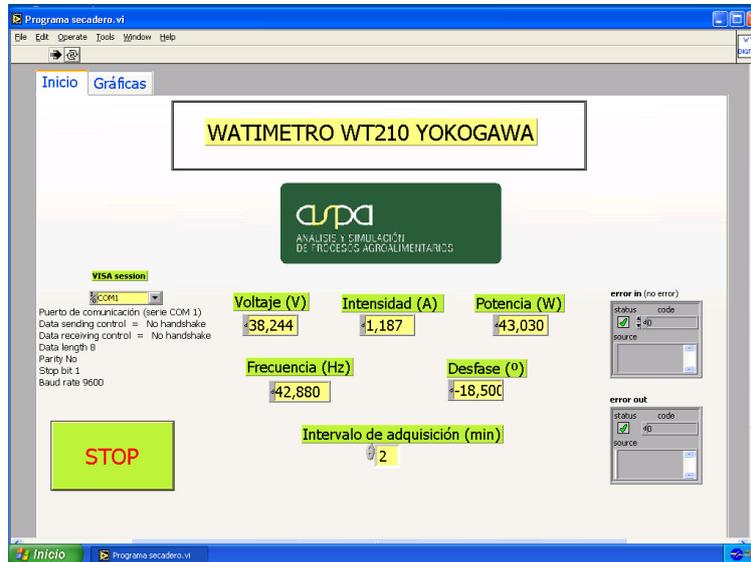


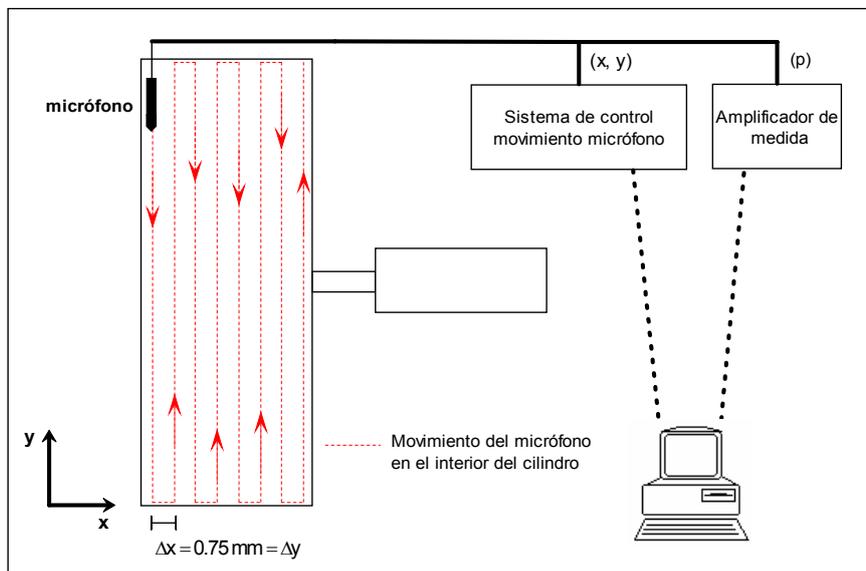
Figura 3.3.7. Aplicación realizada para la visualización y adquisición de los parámetros eléctricos de la señal ultrasónica medidos por el watímetro.

### 3.3.2.3. Caracterización

Antes del montaje del sistema de aplicación ultrasónico en el secadero convectivo se realizaron diversas pruebas para comprobar su correcto funcionamiento y comparar con los valores predichos por la modelización.

En primer lugar, el prototipo ultrasónico se caracterizó en un puente de impedancias (HP 4192A, Hewlett-Packard, EEUU). Los parámetros más relevantes medidos fueron la frecuencia del modo de trabajo, su conductancia, que permite realizar una correcta adaptación de impedancias, y la capacidad interelectrónica, que permite calcular la bobina de compensación y así eliminar la parte reactiva de la impedancia del transductor. Este conjunto de medidas permitieron la adecuada construcción del adaptador de impedancias necesario para un correcto aprovechamiento de la energía eléctrica.

En segundo lugar, se midió de forma experimental el campo acústico generado por el sistema ultrasónico en condiciones de aire en reposo. Debido a la simetría del interior del cilindro, se midieron los niveles de presión sonora con un micrófono a lo largo de un plano en la dirección del diámetro interior del tubo ( $L_x=90$  mm), y cuya altura es igual a la longitud del mismo ( $L_y=310$  mm). En la Figura 3.3.8 se muestra un esquema del montaje experimental para llevar a cabo la medida.



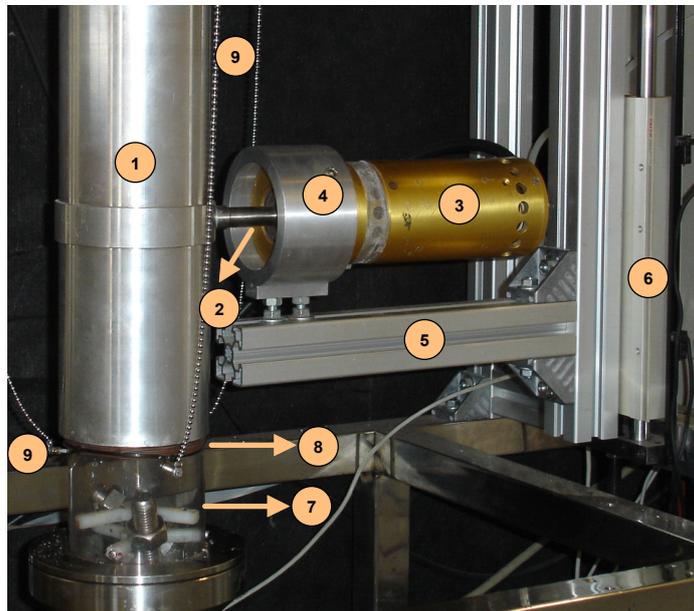
**Figura 3.3.8. Esquema del montaje experimental para la medida del campo acústico en el interior del cilindro vibrante.**

Un sistema de control de movimiento conectado a un ordenador permitió desplazar el micrófono (1/8", sensibilidad 1.06 mV/Pa, GRAS, Holte, Dinamarca) a lo largo de la cámara de secado, realizando medidas en diferentes puntos siguiendo un modo de desplazamiento preestablecido ( $\Delta x = \Delta y = 0.75$  mm) y descrito en la Figura 3.3.8. Siguiendo esta metodología se tomaron 53600 medidas (134x400) de la presión sonora en el interior de la cámara.

### 3.3.3. Adaptación del secadero para la instalación del sistema de aplicación de ultrasonidos de potencia

En la adaptación del secadero para la instalación del prototipo ultrasónico se buscaron dos objetivos:

- Conseguir unas condiciones de trabajo adecuadas para el cilindro vibrante.
- No influir en el sistema de pesada automático del secadero.

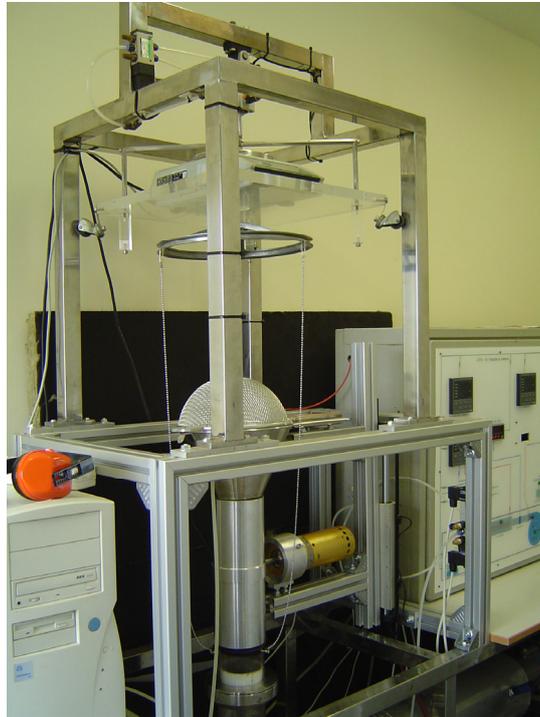


**Figura 3.3.9. Detalle del montaje del sistema ultrasónico de potencia en el secadero convectivo.** 1 Cilindro vibrante, 2 Amplificador mecánico, 3 Transductor ultrasónico tipo sándwich, 4 Brida de anclaje, 5 Soporte metálico, 6 Elemento neumático de subida del sistema ultrasónico, 7 Cámara portamuestras, 8 Junta, 9 Sistema de sujeción para el anclaje de la cámara portamuestras a la balanza.

El sistema de anclaje y sujeción del sistema de aplicación fue fundamental, ya que la vibración del cilindro no puede verse dificultada por ningún elemento, ya que eso podría influir de forma notable en la energía transmitida al medio. Así, el anclaje se realizó por medio de una brida, sujetando la carcasa del transductor tal

y como se muestra en la Figura 3.3.9-4. Unos tornillos fijaron la brida, y con ella el transductor ultrasónico, a un soporte metálico. De esta manera no se perturbó la vibración del cilindro.

Como ya se ha indicado anteriormente, el cilindro vibrante constituye la nueva cámara de secado. En el secadero convectivo convencional, un sistema neumático elevaba la cámara de secado unida a la balanza para realizar la pesada de las muestras que se encontraban en su interior (Apartado 3.3.1). La inclusión del sistema ultrasónico no permitió realizar la pesada del mismo modo, ya que la medida se vería falseada por el rozamiento de sus distintos elementos. Dicho problema se resolvió introduciendo un nuevo sistema neumático para la elevación del sistema ultrasónico durante la pesada, y de esta manera independizarlo de la balanza. Esta última quedó directamente unida a la cámara portamuestras de metacrilato (diámetro interno 100 mm y altura variable) (Figura 3.3.9-7). Una junta plástica colocada en la parte superior de la cámara portamuestras mejora el contacto con el cilindro vibrante, aumentando la estanqueidad del sistema sin dificultar la vibración del cilindro. Un autómata programable (PLC CQM41, OMRON, Japón) controlado desde el ordenador secuencia el proceso de pesada. En la Figura 3.3.10 se muestra el aspecto final del secadero convectivo asistido por ultrasonidos de potencia utilizado en este trabajo.



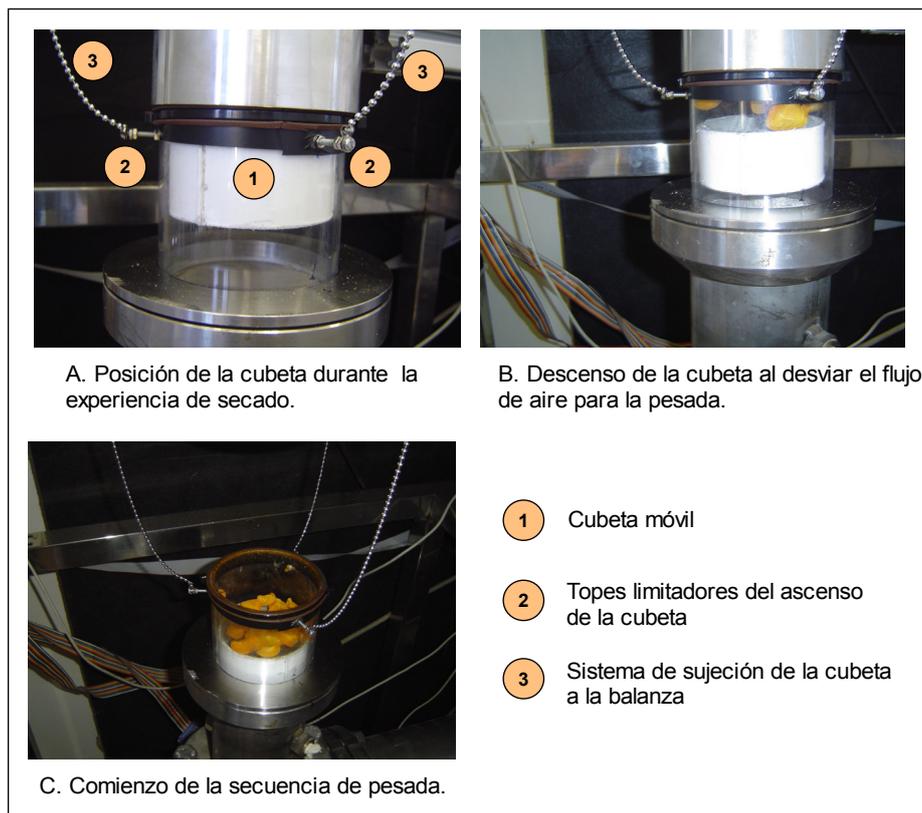
**Figura 3.3.10. Secadero convectivo asistido por ultrasonidos de potencia. Aspecto general.**

#### **3.3.4. Sistemas portamuestras**

Con la adaptación realizada en el secadero convectivo para la aplicación de ultrasonidos de potencia, también se pretendió dotar al sistema de una elevada flexibilidad. La cámara portamuestras colocada permite realizar experiencias tanto en lecho fluidizado como en lecho fijo, únicamente cambiando el sistema portamuestras. A continuación se detallan los distintos sistemas portamuestras utilizados en las experiencias de secado.

**3.3.4.1. Sistema portamuestras para experiencias en lecho fluidizado. Cubeta móvil**

El sistema portamuestras utilizado en las experiencias de lecho fluido se muestra en la Figura 3.3.11. Consta de una cubeta móvil situada en el interior de la cámara portamuestras, que se eleva hasta la base del cilindro vibrante cuando hay flujo de aire. Cuando el flujo de aire es desviado para hacer la pesada, la cubeta móvil descende y las muestras se depositan en su interior. La cubeta está fabricada en material plástico y cuenta con una rejilla metálica en su parte superior. El sistema de cubeta móvil permite mantener a todas las muestras dentro del cilindro vibrante durante la aplicación de los ultrasonidos, ya que es esta la zona donde la energía acústica es máxima.

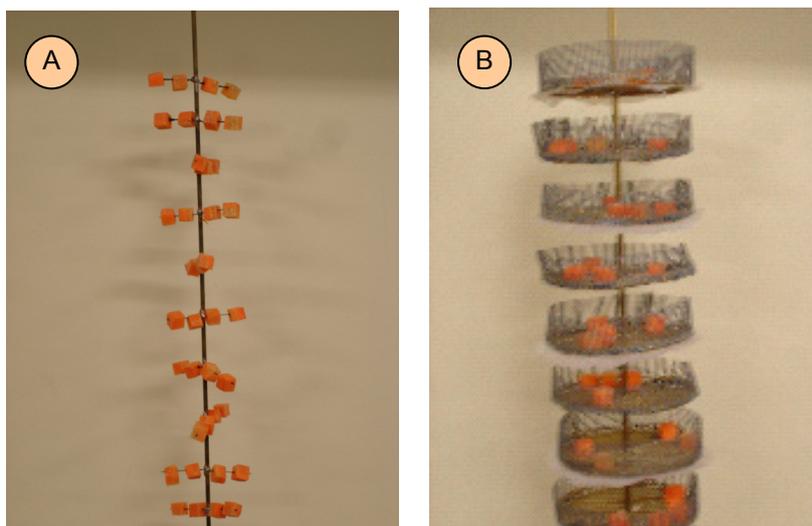


**Figura 3.3.11. Sistema portamuestras de cubeta móvil.**

### 3.3.4.2. Sistema portamuestras para las experiencias en lecho fijo

Se utilizaron dos sistemas portamuestras para las experiencias realizadas en lecho fijo (Figura 3.3.12).

**Sistema árbol (Figura 3.3.12 A):** Este sistema está constituido por un eje central de latón del que parten diez varillas de aluminio perpendiculares a él y distribuidas de forma aleatoria a lo largo del interior del tubo. Las dimensiones del árbol se escogieron de manera que no introdujeran ninguna perturbación en el campo acústico. En este sistema las muestras son insertadas en las varillas.



**Figura 3.3.12. Sistemas portamuestras para las experiencias de lecho fijo.** A. Sistema árbol, B. Sistema de bandejas.

**Sistema de bandejas (Figura 3.3.12 B):** Este sistema está constituido por diez bandejas de 8.4 cm de diámetro sujetas a un eje central de latón. Las bandejas equidistan 3.4 cm entre ellas coincidiendo la primera y la última con los bordes de la cámara de secado. Las bandejas presentan una base

de malla metálica de latón y tienen un borde de malla plástica para evitar la pérdida de las muestras durante la pesada. En el borde inferior de las bandejas se colocaron tiras de papel formando flecos para forzar al aire a pasar a través de las bandejas, y por consiguiente alrededor de las muestras. La localización de las bandejas coincidió con las zonas de máxima presión acústica en el interior del cilindro.

Los sistemas portamuestras se anclaron a la cámara portamuestras tal y como aparece en la Figura 3.3.13, de manera que durante la pesada de las muestras todo el conjunto se comportó de manera solidaria, independizándose del cilindro vibrante. Los sistemas portamuestras de árbol y de bandejas permiten mantener a las muestras dentro del cilindro vibrante cuando las condiciones del flujo de aire no son suficientes para conseguir su fluidización.



**Figura 3.3.13. Anclaje de los sistemas portamuestras en las experiencias de lecho fijo.**

### **3.4. EXPERIENCIAS DE SECADO**

#### **3.4.1. Experiencias en lecho fluidizado**

Las experiencias realizadas en lecho fluidizado se realizaron a 6 temperaturas diferentes: 35, 40, 45, 50, 55 y 60 °C. La velocidad del aire necesaria para la fluidización de las muestras depende del contenido de agua de las mismas. Así, se utilizaron velocidades más altas al principio del secado, para posteriormente ir disminuyéndolas a medida que transcurrió el proceso para no arrastrar a la muestra conforme pierde peso. El intervalo de velocidad de aire utilizado varió entre 10 y 14 m/s. Se realizaron experiencias sin aplicación de ultrasonidos (**SUS**) y con ultrasonidos (**US**) aplicando una potencia eléctrica de 75 W al transductor. Se realizaron experiencias con dos tipos diferentes de muestras, ambas con una densidad de carga másica inicial de 40 kg/m<sup>3</sup>:

- Experiencias con cubos de **zanahoria** de 8.5 mm de lado.
- Experiencias con **albaricoques** cortados en octavos.

Al menos, se efectuaron 3 repeticiones de cada una de las diferentes condiciones experimentales de secado evaluadas.

#### **3.4.2. Experiencias con diferentes velocidades del aire de secado**

Con el objetivo de determinar la influencia de la velocidad del aire en el secado asistido por ultrasonidos de potencia, se realizaron experiencias en lecho fijo variando este parámetro. El rango de velocidades utilizado estuvo comprendido entre 0.5 y 12 m/s. Se llevaron a cabo experiencias sin aplicación de ultrasonidos (**SUS**) y con ultrasonidos (**US**) aplicando una potencia eléctrica de 75 W.

En estas experiencias se utilizó el sistema portamuestras de árbol, lo que permitió mantener la misma distribución de muestras dentro de la cámara de secado para las diferentes velocidades de aire utilizadas. Se realizaron experiencias con diferentes tipos de materias primas y geometrías con el objetivo

de abordar la influencia del material tratado en los efectos de la aplicación de los ultrasonidos de potencia durante el secado.

- Experiencias con cubos de **zanahoria** de 8.5 mm de lado. Se realizaron experiencias a 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 5, 6, 7, 8 y 9 m/s y 40 °C. La densidad de carga másica inicial fue de 12 kg/m<sup>3</sup>.
- Experiencias con cubos de **zanahoria** de 17 mm de lado. Se realizaron experiencias a 0.5, 2, 4, 6, 8 y 10 m/s y 40 °C. La densidad de carga másica inicial fue de 18 kg/m<sup>3</sup>.
- Experiencias con discos de **corteza de limón** (diámetro 18.9 mm y altura 10 mm). Se realizaron experiencias a 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 5, 7 y 9 m/s y 40 °C. En este caso la densidad de carga másica inicial fue de 30 kg/m<sup>3</sup>.
- Experiencias con cilindros de **caqui**, de diámetro 13 mm y altura 30 mm. Se realizaron experiencias a 0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 10 y 12 m/s y 50 °C. La densidad de carga másica inicial fue de 50 kg/m<sup>3</sup>.

En las experiencias de secado con diferentes cubos de zanahoria y corteza de limón únicamente se realizó una repetición para las diferentes condiciones experimentales. Mientras que en el caso de las experiencias de caqui se realizaron al menos tres repeticiones para cada una de las condiciones experimentales ensayadas con el fin de evaluar la repetibilidad de las experiencias.

#### **3.4.3. Experiencias con diferentes temperaturas del aire de secado**

Con el objetivo de determinar la influencia de la temperatura del aire en el secado asistido por ultrasonidos de potencia, se realizaron experiencias en lecho fijo a 5 niveles diferentes de temperatura: 30, 40, 50, 60 y 70 °C y a una velocidad de aire fija de 1 m/s, utilizando el sistema portamuestras de árbol. Se realizaron experiencias sin aplicación de ultrasonidos (**SUS**) y con ultrasonidos (**US**)

aplicando potencia eléctrica de 75 W. Se utilizó como materia prima cubos de zanahoria de 8.5 mm de lado, siendo la densidad de carga másica inicial de 12 kg/m<sup>3</sup>. Al menos se realizaron 3 repeticiones de las experiencias de secado a cada una de las diferentes condiciones experimentales.

#### **3.4.4. Experiencias con diferentes densidades de carga másica**

Con el objetivo de determinar la influencia de la densidad de carga másica en el secado asistido por ultrasonidos de potencia, se realizaron experiencias en lecho fijo a 40 °C y una velocidad de aire fija de 1 m/s, utilizando en este caso el sistema portamuestras de bandejas. Se realizaron experiencias a 11 niveles diferentes de densidad de carga másica dentro del intervalo comprendido entre 12 y 120 kg/m<sup>3</sup> (12, 24, 36, 48, 60, 72, 84, 96, 108 y 120 kg/m<sup>3</sup>). La máxima densidad de carga utilizada corresponde con la máxima carga posible en las bandejas manteniendo una disposición de las muestras en monocapa. Se realizaron experiencias sin aplicación de ultrasonidos (**SUS**) y con ultrasonidos (**US**) aplicando una potencia eléctrica de 75 W. Se utilizó como materia prima cubos de zanahoria de 8.5 mm de lado. Al menos se realizaron 3 repeticiones de las experiencias de secado a cada una de las diferentes condiciones experimentales.

#### **3.4.5. Experiencias con aplicación de diferentes potencias ultrasónicas**

También se evaluó el nivel de potencia eléctrica aplicado para excitar al transductor ultrasónico durante las experiencias ultrasónicas. En adelante se le denominará potencia ultrasónica. Con el objetivo de determinar la influencia de esta variable en el secado asistido por ultrasonidos de potencia, se realizaron experiencias en lecho fijo a 40 °C y una velocidad de aire fija de 1 m/s, utilizando el sistema portamuestras de árbol. Se realizaron experiencias **US** a 9 niveles diferentes de potencia ultrasónica (10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 y 90 W) y también

sin la aplicación de ultrasonidos (**SUS**). Se realizaron experiencias con cubos de zanahoria (8.5 mm de lado) y también con láminas de corteza de limón (espesor 7 mm). Las densidades de carga másica utilizadas fueron de  $12 \text{ kg/m}^3$  para la zanahoria y de  $36 \text{ kg/m}^3$  para la corteza de limón. Al menos se realizaron 3 repeticiones de las experiencias de secado a cada una de las diferentes condiciones experimentales.

#### **3.4.6. Cinéticas de secado**

La evolución de la humedad de las muestras con el tiempo se obtuvo a partir de la evolución del peso de las muestras durante el secado y de la humedad inicial de las mismas.

Previamente al comienzo de la experiencia de secado, las muestras envueltas en film plástico fueron atemperadas durante 20 minutos en las mismas condiciones de temperatura y velocidad de aire que posteriormente se utilizarían en la experiencia de secado. El atemperamiento se realizó para aproximar la temperatura de las muestras, almacenadas en refrigeración ( $4 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ ) hasta ese momento, a la temperatura de secado.

La duración de las experiencias de secado de los diferentes productos utilizados en este trabajo se extendió hasta una pérdida de peso predeterminado de las muestras respecto a su peso inicial, determinado en función de la humedad inicial del producto. Los porcentajes de pérdida de peso seleccionados variaron para los diferentes productos según su contenido inicial de humedad: zanahoria y albaricoque (80 %), corteza de limón (60 %) y caqui (75 %).

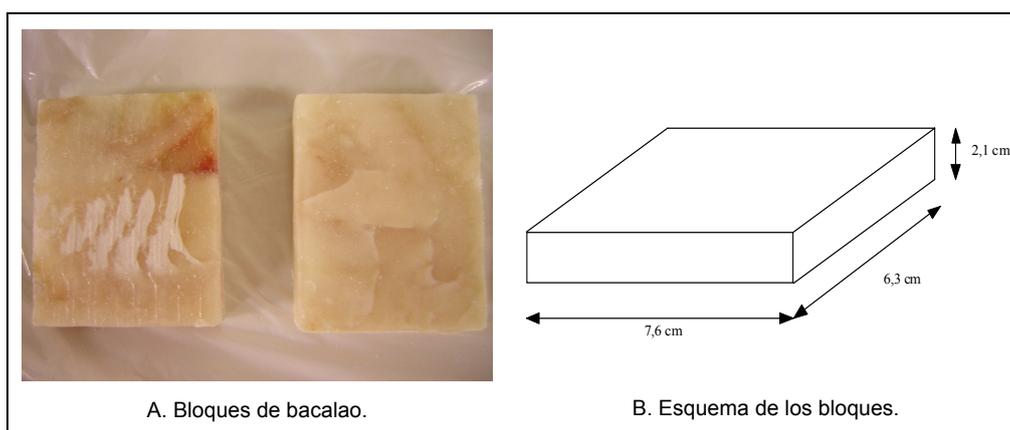
Los intervalos de tiempo fijados entre las pesadas durante las experiencias de secado también variaron para los diferentes productos: zanahoria (2 minutos), albaricoque (4 minutos), corteza de limón y caqui (10 minutos). Esta variación está en relación con el tiempo total de secado de cada producto. Así en los que el secado fue más largo, se espaciaron las pesadas para evitar tener un excesivo número de puntos experimentales.

### 3.5. LIOFILIZACIÓN A PRESIÓN ATMOSFÉRICA DE BACALAO

Las experiencias de liofilización a presión atmosférica de bacalao fueron realizadas en los laboratorios de secado (“Dewatering Laboratory”) de la Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología (NTNU) y el instituto de investigación SINTEF-Energy, en Trondheim (Noruega).

#### 3.5.1. Materia prima

La materia prima utilizada en las experiencias fue bacalao prensado, congelado y cortado en bloques de 7.6 x 6.3 x 2.1 cm (Figura 3.5.1). El producto fue adquirido en los mercados locales noruegos.



**Figura 3.5.1. Bloques de bacalao congelado.**

Los bloques de bacalao fueron almacenados en congelación (-20 °C) hasta la preparación de la muestra. A partir de los bloques originales, se prepararon dos tipos diferentes de muestras de bacalao: bacalao granulado y cubos de bacalao. La preparación de las muestras de bacalao tuvo como dificultad evitar su descongelación durante esta fase.



Figura 3.5.2. Bacalao granulado.



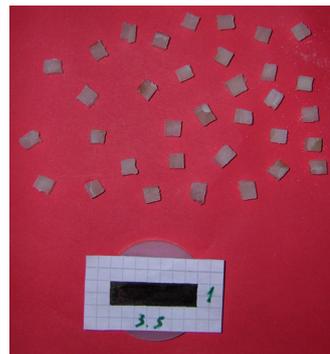
A. Corte de las láminas.



B. Corte de los paralelepípedos.



C. Corte de cubos (5 mm de lado).



D. Cubos de bacalao.

Figura 3.5.3. Preparación de cubos de bacalao.

**Bacalao granulado:** Antes de proceder a la granulación, los bloques se dejaron 25 minutos fuera de la cámara de congelación a una temperatura ambiente de  $25\pm 2$  °C. Así se facilitó la operación de granulado y se redujo la cantidad de material desechado. La granulación se realizó en un equipo provisto de dos discos de corte con orificios de 5 mm de diámetro. Se obtuvieron gránulos en forma de lámina de un tamaño muy variable. Los gránulos se tamizaron con cribas de 3.5 mm de diámetro, seleccionándose el material de mayor tamaño. Así, se obtuvieron gránulos en forma de lámina de entre 2 y 3 mm de espesor y entre 3.5 y 5 mm de anchura. La longitud de los gránulos fue variable (Figura 3.5.2). Toda la manipulación de las muestras se hizo dentro de la cámara de congelación, para evitar la descongelación de las muestras.

**Cubos de bacalao.** Para las experiencias de secado con cubos, el bacalao se cortó a 5 mm de lado. El corte se realizó con una sierra eléctrica y la regulación del corte se realizó de forma manual. Tal y como se aprecia en la Figura 3.5.3, en primer lugar se obtuvieron láminas a partir de las piezas originales, a partir de éstas, paralelepípedos, y finalmente, los cubos. La operación de corte se realizó en condiciones de refrigeración (0 °C) para evitar la descongelación rápida y facilitar el corte.

Las muestras preparadas se mantuvieron en condiciones de congelación (-20 °C) hasta la realización de las experiencias de secado.

### **3.5.2. Secadero convectivo con bomba de calor.**

El secadero con bomba de calor utilizado en las experiencias de secado de bacalao se muestra esquemáticamente en la Figura 3.5.4.

El secadero está provisto de una cámara cilíndrica de metacrilato de 25 cm de diámetro y 50 cm de altura. El aire es impulsado por un soplante y un anemómetro de hilo caliente mide la velocidad del flujo. El operador selecciona la velocidad del aire actuando directamente sobre el variador de frecuencia (HFC-VWS, HITACHI, Japón) que alimenta al soplante.

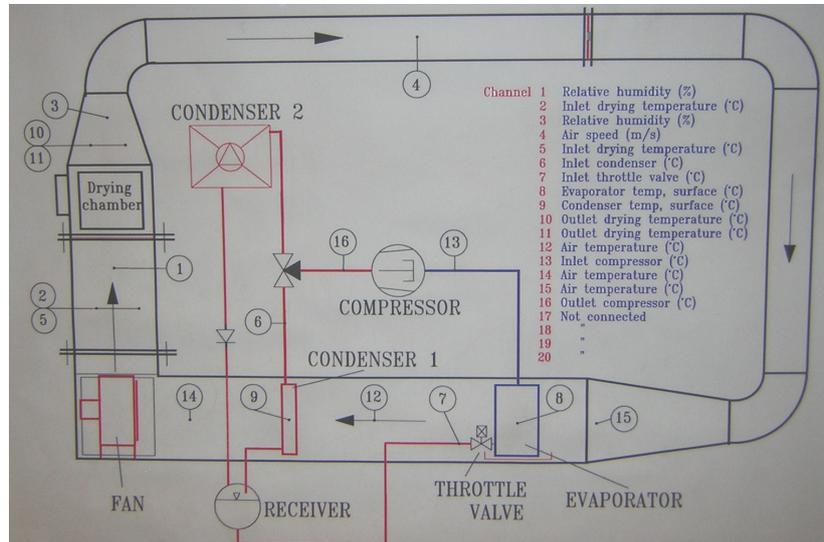


Figura 3.5.4. Esquema del secadero convectivo con bomba de calor.

La principal diferencia con el secadero, ya descrito, del Departamento de Tecnología de Alimentos (Apartado 3.3.1) se encuentra en el sistema de regulación de temperatura. Las resistencias calefactoras son sustituidas en este caso por un evaporador y un condensador (condensador 1) de un circuito de refrigeración, ambos colocados obviamente dentro del conducto por donde circula el aire (Figura 3.5.4). El aire de secado es recirculado para mejorar la eficiencia energética del sistema. Así, al pasar por el evaporador disminuye su temperatura y humedad absoluta, y al pasar por el condensador 1 alcanza la temperatura de trabajo y disminuye su humedad relativa. La temperatura es controlada por un controlador de procesos (FCR, Sinhó, Corea) que actúa sobre una válvula de tres vías para regular el caudal de líquido refrigerante que le llegará al condensador 1. Si se pretende trabajar con una temperatura muy baja, la válvula desviará la mayor parte del líquido refrigerante a un condensador externo (condensador 2) con lo que el aire al pasar por el condensador 1 no aumentará demasiado su temperatura. Si por el contrario se quieren alcanzar temperaturas elevadas, el caudal de líquido refrigerante que circulará por el condensador 1 será mayor. Este sistema permite trabajar con un amplio rango de temperaturas, entre -20 y 100 °C,

y con un aire muy seco. Todos los elementos del secadero que están en contacto con el ambiente se encuentran perfectamente aislados.

A lo largo del secadero se colocaron diferentes sensores para medir las propiedades del aire de secado en diversos puntos del circuito (Figura 3.5.4). Entre otras variables, se midió la velocidad, la humedad relativa y la temperatura. Los diferentes sensores estaban conectados con una unidad de adquisición de datos (FLUKE HYDRA, FLUKE, EEUU) que permite la visualización y adquisición de los valores de las diferentes variables al estar conectada con un ordenador.

### 3.5.3. Experiencias de secado

Se realizaron experiencias de secado de bacalao tanto para las muestras granuladas como para los cubos de bacalao. Se realizaron experiencias a temperatura constante (-10, -5, 0, 15 y 30 °C) y también combinando temperaturas (-10/30 y -5/30): negativas en la primera parte del secado y positivas a partir de humedades inferiores a 0.4 (b.h.). Las experiencias con bacalao granulado se realizaron a una densidad de carga de 30 kg/m<sup>3</sup> y con los cubos a 40 kg/m<sup>3</sup>. En la Tabla 3.5.1 se muestra un resumen de las experiencias realizadas. Todas las experiencias se realizaron en condiciones de lecho móvil, para lo cuál la velocidad del aire se mantuvo entre 3 y 5 m/s en función del contenido de humedad y el tipo de muestra.

Muestra	Temperaturas (°C)						
	-10	-5	-10/30	-5/30	0	15	30
<b>Granulado</b>							
30 kg/m <sup>3</sup>	X	X	X	X	X	X	X
<b>Cubos</b>							
40 kg/m <sup>3</sup>	X	X	X	X	X	X	X

**Tabla 3.5.1. Experiencias de secado de bacalao.**

La cinética de secado se obtuvo a partir de la medida de la evolución de la humedad de las muestras con el tiempo. Para ello se tomaron muestras cada

cierto tiempo de la cámara de secado. El intervalo de la toma de muestras fue de 30 minutos cuando se trabajó con temperaturas negativas y 15 minutos con temperaturas positivas. Las experiencias de secado se prolongaron hasta que la variación de humedad de las muestras fue menor del 1 % (b.h.) entre dos medidas consecutivas.

#### **3.5.4. Medidas experimentales**

A continuación se describen las medidas experimentales realizadas en las muestras de bacalao. En cada muestra se midió la actividad de agua, el color y el contenido de humedad. Finalmente en el producto seco se midió, la capacidad de rehidratación, el encogimiento y la densidad aparente del lecho.

##### **3.5.4.1. Humedad**

La humedad del bacalo se midió utilizando una lámpara de infrarrojos (LP16, Mettler, EEUU) acoplada a una balanza (PM200, Mettler, EEUU). La determinación se realizó siguiendo el manual del fabricante para productos de bajo contenido en grasas utilizando una masa de muestra entre 1.5 y 2 g.

##### **3.5.4.2. Actividad de agua**

La medida de la actividad de agua se realizó con un higrómetro eléctrico (CX-2, Aqualab, EEUU). La determinación se realizó a una temperatura media de  $25 \pm 2$  °C.

##### **3.5.4.3. Color**

El color de las muestras se midió con un espectro-colorímetro (948, X-Rite, EEUU) usando un observador  $10^\circ$  y un iluminante  $D_{65}$ . Los resultados se expresaron en las coordenadas CIE  $L^*a^*b^*$ . El parámetro  $L^*$  del espacio de color

uniforme CIE L\*a\*b\* mide la luminosidad, variable que se identifica con la propiedad de los materiales de reflejar, en mayor o menor grado, la luz que lo ilumina. Así, el color blanco representa el color de máxima luminosidad y el color negro la mínima.

#### **3.5.4.4. Densidad aparente**

La densidad aparente del lecho del producto seco se midió pesando un volumen conocido de muestra (500 mL) utilizando una balanza (6000, Mettler, EEUU).

#### **3.5.4.5. Capacidad de rehidratación**

La capacidad de rehidratación del bacalao seco se midió sumergiendo en agua ( $19.5 \pm 2.0$  °C) durante 6 minutos 0.1 g de muestra seca para el bacalao granulado y 0.2 g para los cubos. Las muestras se colocaron sobre un papel de filtro para su inmersión en el agua. Finalmente las muestras se colocaron en un embudo de Büchner y utilizando un matraz Kitasato se aplicó vacío durante tres minutos para eliminar la humedad superficial.

La capacidad de rehidratación se calculó a partir de la relación entre la masa final y la inicial, la pesada de las muestras se realizó en una balanza (PM200, Mettler, EEUU).

Las experiencias de rehidratación se realizaron por triplicado para las muestras secadas a las diferentes condiciones experimentales.

#### **3.5.4.6. Encogimiento**

El encogimiento de las muestras se estimó a partir de imágenes fotográficas de las muestras frescas y de las secas y se calculó a partir de la variación de volumen durante el secado con respecto al volumen inicial.

Las imágenes tomadas fueron analizadas con el programa SigmaScan Pro 5 (SPSS Inc., EEUU). Este programa permitió medir, entre otras variables, la superficie de una de las caras de las muestras. Dicha medida se realizó en píxeles y de forma individual para cada muestra. En cada fotografía se introdujo una escala para transformar los píxeles en unidades de longitud. Obviamente, a partir de esta medida sólo se puede calcular el volumen de la muestra en caso de geometrías regulares, por lo que solamente se determinó el volumen de las muestras en forma de cubos.

### **3.6. MODELIZACIÓN DE LAS CINÉTICAS DE SECADO**

A continuación se muestran los diferentes modelos utilizados para la descripción matemática de las cinéticas de secado. Además, se describe la influencia de la temperatura y/o la velocidad del aire en los parámetros cinéticos de los modelos, los métodos de optimización usados para la identificación de los parámetros de los modelos, el cálculo de la bondad de los ajustes y, finalmente, el análisis estadístico de los resultados.

#### **3.6.1. Modelos difusionales**

Las ecuaciones de gobierno del transporte de materia se obtuvieron a partir del planteamiento del balance microscópico de materia en el volumen control y aplicando la ley de Fick. En las Ec. 3.6.1, 3.6.2 y 3.6.3 se muestran las expresiones obtenidas para las geometrías de lámina infinita, cilindro finito y cubo. Como hipótesis, se consideró la difusividad efectiva constante, y el sólido homogéneo e isótropo.

$$\frac{\partial W_p(x,t)}{\partial t} = D_e \left( \frac{\partial^2 W_p(x,t)}{\partial x^2} \right) \quad (\text{Ec. 3.6.1})$$

$$\frac{\partial W_p(r,x,t)}{\partial t} = D_e \left( \frac{\partial^2 W_p(r,x,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial W_p(r,x,t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 W_p(r,x,t)}{\partial x^2} \right) \quad (\text{Ec. 3.6.2})$$

$$\frac{\partial W_p(x,y,z,t)}{\partial t} = D_e \left( \frac{\partial^2 W_p(x,y,z,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W_p(x,y,z,t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W_p(x,y,z,t)}{\partial z^2} \right) \quad (\text{Ec. 3.6.3})$$

Donde r, x, y, z representan respectivamente las direcciones características de las geometrías de lámina infinita, cilindro finito y cubo.

Para resolver estas ecuaciones (Ecs. 3.6.1, 3.6.2 y 3.6.3) se necesita una condición inicial y dos condiciones de contorno para cada dirección característica.

Generalmente, se considera como condición inicial que la humedad del producto en el instante inicial del proceso de secado es igual en todos sus puntos. Para una geometría de lámina infinita esta condición inicial se muestra en la Ec. 3.6.4.

$$W_p(x,0) = W_0 \quad (\text{Ec. 3.6.4})$$

En cuanto a las condiciones de contorno, una de las que se suele utilizar es aquella que tiene en cuenta la simetría del sólido. En la Ec. 3.6.5 se muestra esta condición de contorno para una geometría de lámina infinita.

$$\frac{\partial W_p(0,t)}{\partial x} = 0 \quad (\text{Ec. 3.6.5})$$

La otra condición de contorno que se suele utilizar hace referencia a la resistencia externa a la transferencia de materia. Los modelos utilizados en este trabajo se han clasificado en dos grupos en función de si desprecian la resistencia externa a la transferencia de materia o si la tienen en cuenta.

### **3.6.1.1. Modelos que no consideran la resistencia externa (SRE)**

En los modelos que desprecian la resistencia externa a la transferencia de materia, se asumió que el proceso de secado fue controlado exclusivamente por el movimiento del agua en el interior del sólido. Por lo tanto, se supuso que los puntos de la superficie del sólido alcanzaron la humedad de equilibrio nada más entrar en contacto con el aire de secado. La condición de contorno que expresa esa suposición para una lámina infinita se muestra en la Ec. 3.6.6.

$$W_p(L,t) = W_e \quad (\text{Ec. 3.6.6})$$

Una vez formulado el problema difusional, es decir obtenida la ecuación de gobierno y las condiciones iniciales y de contorno, se debe proceder a su resolución. En los casos en que no se tiene en cuenta la resistencia externa, se puede abordar la resolución analítica del problema. Crank (1975) recopiló las ecuaciones difusionales para diferentes geometrías sencillas resueltas utilizando el método de separación de variables. La solución analítica que se obtiene debe integrarse para todo el volumen del sólido para obtener su humedad media. En las Ec. 3.6.7 y Ec. 3.6.8 se muestran estas soluciones para las geometrías de lámina infinita y cilindro infinito.

$$W(t) = W_e + (W_0 - W_e) \left[ \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} \exp\left(-\frac{D_e (2n+1)^2 \pi^2 t}{4L^2}\right) \right] \quad (\text{Ec. 3.6.7})$$

$$W(t) = W_e + (W_0 - W_e) \left[ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8}{\alpha_n^2} \exp\left(-\frac{D_e \alpha_n^2 t}{R^2}\right) \right] \quad (\text{Ec. 3.6.8})$$

Donde  $\alpha_n$  representan los valores característicos determinados por las raíces de la función de Bessel de primer tipo y orden cero.

Las soluciones del problema difusional para las geometrías de cilindro finito (Ec. 3.6.9) y cubo (Ec. 3.6.10) se pueden obtener a partir de las Ec. 3.6.7 y Ec. 3.6.8. Un cilindro finito se puede considerar como el volumen determinado por la intersección de una lámina infinita de espesor  $2L$  y un cilindro infinito de radio  $R$  (Eq. 3.6.9). Mientras, un cubo puede considerarse como la intersección de tres láminas de espesor  $2L$  (Ec. 3.6.10).

$$W(t) = W_e + (W_0 - W_e) \left[ \frac{\sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} \exp\left(-\frac{D_e (2n+1)^2 \pi^2 t}{4L^2}\right)}{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{8}{\alpha_n^2} \exp\left(-\frac{D_e \alpha_n^2 t}{R^2}\right)} \right] \quad (\text{Ec. 3.6.9})$$

$$W(t) = W_e + (W_0 - W_e) \left[ \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} \exp\left(-\frac{D_e (2n+1)^2 \pi^2 t}{4L^2}\right) \right]^3 \quad (\text{Ec. 3.6.10})$$

### 3.6.1.2. Modelos que consideran la resistencia externa (RE)

En los modelos que consideran la resistencia externa a la transferencia de materia, la condición de contorno mostrada en la Ec. 3.6.6 debe sustituirse por la mostrada en la Ec. 3.6.11 (para el caso de una geometría de lámina infinita). Esta expresión refleja como todo el flujo de agua que llega a la superficie del sólido por difusión se transfiere al aire por convección. El movimiento del agua hasta la superficie del sólido se describe con la difusividad efectiva ( $D_e$ ), mientras que el coeficiente de transferencia de materia ( $k$ ) describe el paso del agua a la fase gaseosa.

$$-D_e \rho_{ss} \frac{\partial W_p(L,t)}{\partial x} = k(\varphi_e(L,t) - \varphi_{\text{aire}}) \quad (\text{Ec. 3.6.11})$$

Cuando se incluye esta ecuación de contorno, ya no es posible abordar la resolución analítica de la ecuación difusional, por lo que es necesario recurrir a métodos numéricos. En este trabajo se utilizó el método implícito de diferencias finitas (Anejo 8) para resolver el problema de transporte en los casos de las geometrías de lámina infinita, cilindro finito y cubo. Este método resulta útil para geometrías regulares (Simal et al., 1996; Simal et al., 2005b).

Para la aplicación del método de diferencias finitas, el volumen original de la muestra se dividió en un número constante de elementos, constituyendo una red de sub-volúmenes. Posteriormente, se planteó la ecuación de gobierno en cada uno de estos subvolúmenes, aproximando las derivadas parciales a ecuaciones algebraicas utilizando el método de diferencias finitas (Anejo 8). A modo de ejemplo, en la Ec. 3.6.12 se muestra la relación general del contenido de humedad local de un sub-volumen cualquiera para una geometría plana. Esta humedad local es una función del contenido de humedad de los sub-volúmenes que le rodean y del mismo sub-volumen en un instante de tiempo anterior. La expresión particular para cada sub-volumen situado en los límites del volumen control considerado se obtiene al tener en cuenta sus propias condiciones de contorno.

$$W_p(i,t-\Delta t) = \frac{D_e \Delta t}{\Delta x^2} \left[ W_p(i,t) \left( \left( \frac{\Delta x^2}{D_e \Delta t} \right) + 2 \right) - W_p(i+1,t) - W_p(i-1,t) \right] \quad (\text{Ec. 3.6.12})$$

Las dimensiones características de los sub-volúmenes vienen determinadas por  $\Delta x = L/(n-1)$ , siendo  $n$  el número de subvolúmenes considerado. La precisión de este método de resolución dependerá del valor de  $\Delta x$  y también del incremento de tiempo ( $\Delta t$ ) seleccionados.

Un conjunto de funciones fueron implementadas, usando el lenguaje de programación de MATLAB, para resolver el conjunto de ecuaciones implícitas de la red de sub-volúmenes que permitió obtener el perfil de humedades dentro del sólido y la humedad media (ambas como funciones del tiempo de secado).

### **3.6.2. Modelo de Weibull**

El modelo de Weibull (Ec. 1.1.14) también se ha utilizado para describir las cinéticas de secado de los diferentes productos utilizados en este trabajo. La utilización de este modelo empírico tiene como objetivo comparar los resultados de los modelos teóricos con un modelo de menor complejidad, de manera que se

pueda evaluar el esfuerzo realizado en la modelización de acuerdo a los resultados obtenidos en la misma.

### **3.6.3. Efecto de la temperatura**

Generalmente, los parámetros cinéticos de los modelos presentan una relación de tipo Arrhenius con la temperatura (Rosselló et al., 1992; Maroulis et al., 2001; Sanjuán et al., 2004; Mulet et al., 2005). En las Ec. 3.6.13 y Ec. 3.6.14 se muestran las relaciones de la difusividad efectiva y de la inversa del parámetro cinético del modelo de Weibull ( $\beta$ ) con la temperatura de acuerdo a la expresión de Arrhenius. A partir de estas ecuaciones se puede identificar la energía de activación del proceso de secado ( $E_a$ , kJ/mol).

$$D_e = D_o \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (\text{Ec. 3.6.13})$$

$$1/\beta = 1/\beta_o \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (\text{Ec. 3.6.14})$$

### **3.6.4. Influencia de la velocidad del aire en el coeficiente de transferencia de materia**

La analogía entre transferencia de momento y materia permite definir el factor  $j_D$  (Roshenow y Choi, 1961) (Ec. 3.6.15).

$$j_D = St Sc^{2/3} \quad (\text{Ec. 3.6.15})$$

A partir de la ecuación anterior y teniendo en cuenta la definición de los módulos adimensionales de Stanton ( $St$ ) y Schmidt ( $Sc$ ), se puede obtener una expresión que permite calcular el coeficiente de transferencia de materia (Ec. 3.6.16).

$$k = \frac{j_D D_{wa} Re}{2R Sc^{-1/3}} \quad (\text{Ec. 3.6.16})$$

Donde R representa el radio de la esfera y  $D_{wa}$  la difusividad del agua en aire (Perry et al., 1992).

Rohsenow y Choi (1961) mostraron una relación empírica entre el factor  $j_D$  y el número de Reynolds. Teniendo en cuenta la relación del número de Reynolds con la velocidad, el coeficiente de transferencia de materia puede expresarse como una función de la velocidad del aire.

$$k = \text{Cte } v^{1+m} \quad (\text{Ec. 3.6.17})$$

Donde m viene determinado por la relación de  $j_D$  con la velocidad del aire.

### **3.6.5. Influencia de la temperatura del aire en el coeficiente de transferencia de materia.**

Perry y Green (1997) determinaron de forma experimental una expresión empírica para determinar la relación entre el coeficiente de transferencia de materia entre un cuerpo de geometría esférica y un fluido estanco que le rodea. Dicha relación empírica es mostrada en la siguiente expresión matemática (Ec. 3.6.18).

$$k = \frac{D_{wa}}{R} \quad (\text{Ec. 3.6.18})$$

Donde R representa la longitud característica de cada geometría y  $D_{wa}$  la difusividad del agua en aire (Perry et al., 1992). Teniendo en cuenta la relación de la temperatura con la difusividad del agua en aire (Perry et al., 1992), se puede obtener una relación entre el coeficiente de transferencia de materia y la temperatura.

La ecuación anterior puede extrapolarse a cualquier tipo de geometría considerando una esfera de igual volumen que la geometría a estudiar.

### **3.6.6. Identificación paramétrica. Métodos de optimización.**

Se utilizaron dos métodos diferentes para la identificación de los parámetros de los modelos.

En el modelo de Weibull y en los modelos difusionales que no consideran la resistencia externa (modelos SRE) se utilizó el método de optimización del gradiente reducido generalizado (GRG), disponible en la herramienta Solver de la hoja de cálculo de Microsoft Excel XP Profesional. La función objetivo seleccionada para la identificación de los parámetros,  $\alpha$  y  $\beta$  en el modelo de Weibull y  $D_e$  en los modelos difusionales, fue la suma de las diferencias al cuadrado entre las humedades experimentales y las calculadas con el modelo. Se buscaron los valores de dichos parámetros que minimizaron el valor de la función objetivo.

En los modelos difusionales que consideran la resistencia externa a la transferencia de materia (modelos RE) se utilizó el método de optimización Simplex disponible en la función `fminsearch` de MATLAB. Los dos parámetros de los modelos, difusividad efectiva y coeficiente de transferencia de materia, se identificaron de forma simultánea a partir de los datos experimentales. Tanto la función objetivo utilizada como el criterio de búsqueda de los valores óptimos fue el mismo que en el caso anterior.

### **3.6.7. Determinación de la bondad de los ajustes.**

La bondad de los ajustes obtenidos con los diferentes modelos utilizados fue evaluada a partir de la varianza explicada (Ec. 3.6.19) (Lipson y Sheth, 1973) y el error medio relativo (Ec. 3.6.20) (Nguyen et al., 2004; Garau et al., 2006).

$$\text{VAR} = \left[ 1 - \frac{S_{xy}^2}{S_y^2} \right] \cdot 100 \quad (\text{Ec. 3.6.19})$$

$$\text{EMR} = \frac{100}{N} \left[ \sum_{i=1}^N \frac{|W_{\text{expi}} - W_{\text{calci}}|}{W_{\text{expi}}} \right] \quad (\text{Ec. 3.6.20})$$

La varianza explicada representa la varianza relativa explicada por el modelo respecto a la varianza total de los datos. El error medio relativo determina la diferencia entre los valores calculados y los experimentales respecto a los valores experimentales. Valores del EMR inferiores al 10 % indican un ajuste razonable para la mayoría de los casos prácticos.

### **3.6.8. Análisis estadístico**

Se utilizó el análisis de varianza multifactorial (ANOVA) y los intervalos LSD (Least Significant Difference) ( $p < 0.05$ ) para evaluar la significación estadística de influencia de las diferentes variables en los parámetros de los modelos. El análisis estadístico se realizó utilizando el paquete Statgraphics Plus 5.1.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE APLICACIÓN DE ULTRASONIDOS DE POTENCIA

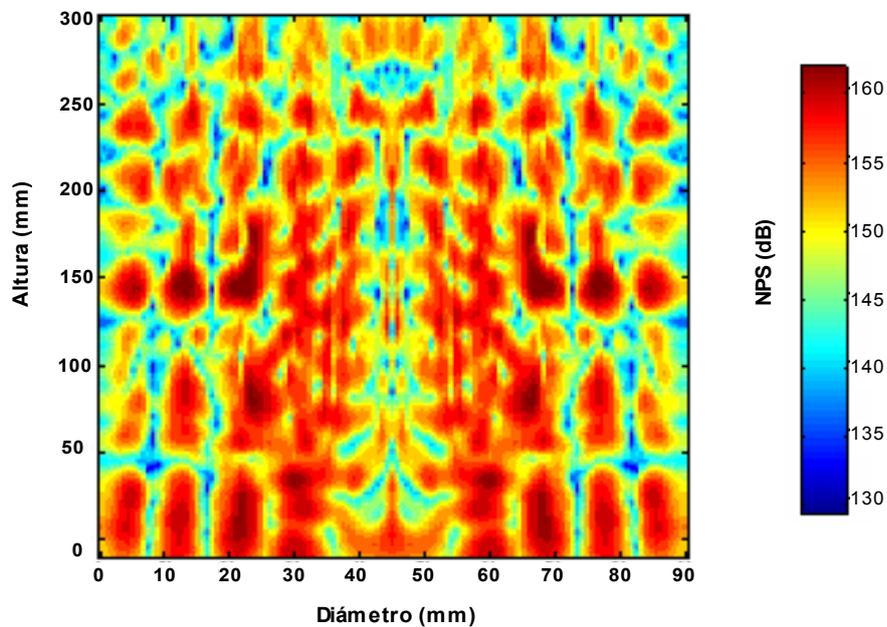
En el Apartado 3.3.2.1 se describió de forma detallada el diseño del sistema para aplicación de ultrasonidos de potencia en el secado convectivo. Dicho diseño se basó en el objetivo de conseguir que las propias paredes de la cámara de secado se encargaran de radiar la energía acústica. Para ello, se construyó un sistema de aplicación ultrasónico consistente en un emisor cilíndrico (120 mm de diámetro externo, 10 mm de espesor y una longitud de 310 mm) excitado por un vibrador compuesto por un transductor tipo sándwich y un amplificador mecánico (Apartado 3.3.2.1).

Una vez construido el sistema de aplicación, fue necesario evaluar su funcionamiento. En un primer lugar, se realizó una caracterización previa en los laboratorios del Instituto de Acústica (CSIC) para comprobar si se alcanzaron los objetivos planteados en la fase de diseño. En un segundo lugar, fue necesario estudiar su funcionamiento en condiciones de trabajo, es decir una vez instalado con el resto de componentes del sistema ultrasónico (Apartado 3.3.2.2) en el secadero convectivo.

#### 4.1.1. Caracterización previa

Las propiedades eléctricas del sistema de aplicación ultrasónico fueron medidas en un puente de impedancias. Entre otros parámetros, se determinaron la frecuencia de su modo de trabajo (21.9 kHz), la conductancia (2.7 mS), la impedancia (365  $\Omega$ ) y la capacidad interelectrónica (8 nF). A partir de los valores medidos de conductancia y capacidad interelectrónica se pudo construir el adaptador de impedancias necesario para optimizar eléctricamente el sistema ultrasónico (Apartado 3.3.2.2).

Los valores medidos en el puente de impedancias se compararon con los registrados por un watímetro al aplicar al transductor una potencia eléctrica de 90 W. Los valores medios registrados en este caso fueron: frecuencia 21.8 kHz, voltaje 60 V, intensidad 1.55 A, desfase 4° e impedancia 329  $\Omega$ . Se puede comprobar que tanto la frecuencia como la impedancia medidas con el watímetro resultaron similares a las obtenidas en el puente de impedancias. Hay que destacar que los valores determinados con el watímetro resultan más precisos ya que muestran las características eléctricas de la señal de excitación del transductor en condiciones de funcionamiento.



**Figura 4.1.1. Distribución del campo acústico en el interior del cilindro vibrante cuando es excitado con una potencia eléctrica de 75 W.**

También, se estudió la variación de estos parámetros con el tiempo y la potencia aplicada. Se observó que al aumentar la potencia, la resistencia del modo resonante aumentó ligeramente, mientras que la frecuencia correspondiente disminuyó. Por el contrario, para potencias medias (70-90 W), y tras cierto tiempo transcurrido, se observó una disminución de la frecuencia y de la impedancia del

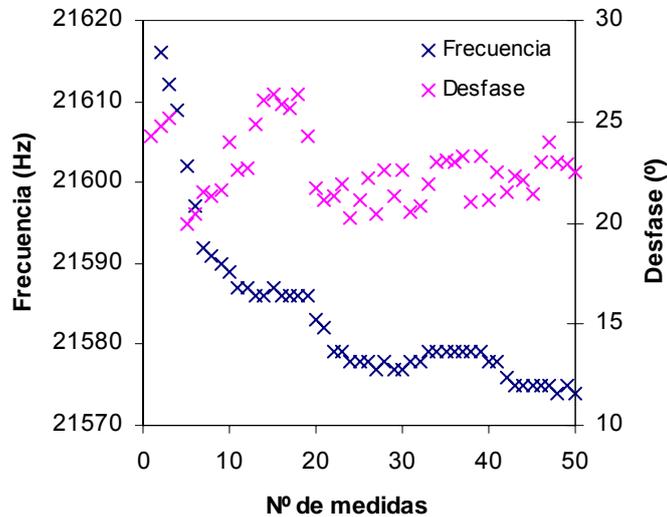
modo resonante, así como un calentamiento del transductor. Este es un comportamiento típicamente no lineal de los sistemas ultrasónicos de potencia.

Por último se midió de forma experimental el campo acústico generado en el interior del cilindro vibrante siguiendo el procedimiento descrito en el Apartado 3.3.2.3. En la Figura 4.1.1 se presenta la distribución del campo acústico, medido como nivel de presión sonora (NPS, dB) en el interior del cilindro cuando se aplicó al transductor una potencia de 75 W. El valor medio de la presión sonora en la cámara se obtuvo integrando los valores obtenidos para todo el volumen mediante una función realizada en Matlab. Para una potencia eléctrica aplicada de 75 W se obtuvo un valor medio de 154.3 dB, valor que se aproxima mucho al valor predicho a partir de la modelización con elementos finitos (156.35 dB).

#### **4.1.2. Estudio del comportamiento del sistema de aplicación de ultrasonidos en condiciones de trabajo**

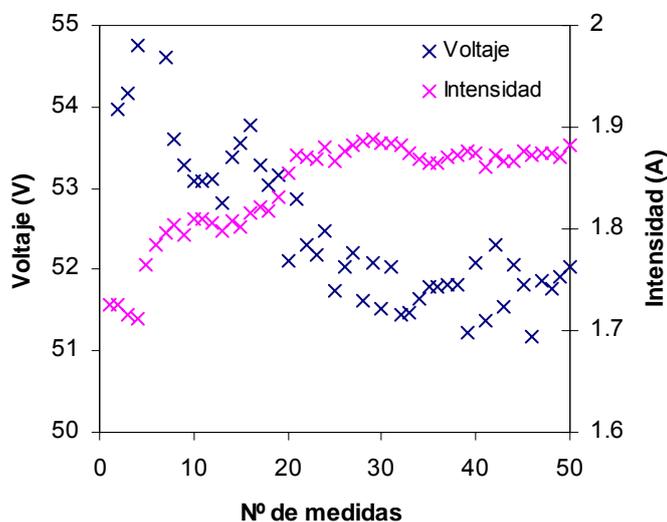
Durante las experiencias de secado se registraron algunos parámetros de la señal eléctrica utilizada para excitar al transductor ultrasónico. Los parámetros eléctricos se midieron con un watímetro y se almacenaron en un ordenador utilizando una aplicación desarrollada en LabVIEW™ (National Instruments), tal y como se describe en el Apartado 3.3.2.2.

En las Figuras 4.1.2 y 4.1.3 se muestra, a modo de ejemplo, la evolución de las principales variables de la señal eléctrica durante una experiencia de secado. Estos parámetros resultan muy útiles para evaluar el funcionamiento del sistema de aplicación ultrasónico en condiciones de trabajo y comparar con los registrados en la caracterización previa.



**Figura 4.1.2. Frecuencia y desfase de la señal eléctrica que excita el transductor ultrasónico (90 W), secado de láminas de corteza de limón a 40 °C y 1 m/s. Intervalo entre medidas 2 minutos.**

Los parámetros eléctricos medidos durante las experiencias de secado fueron similares a los registrados en los bancos de prueba y laboratorios del Instituto de Acústica (CSIC, Madrid). La frecuencia de resonancia del transductor fue cercana al rango de valores obtenidos en la caracterización (21.8-21.9 kHz). Como se puede observar en la Figura 4.1.2, este parámetro disminuyó ligeramente a lo largo del tiempo de funcionamiento, lo cual es un síntoma del calentamiento del sistema. El desfase de la señal eléctrica osciló alrededor de 22°. Este parámetro resultó ligeramente superior al medido durante la caracterización previa del transductor, sin embargo, esto no supone una reducción apreciable de la potencia real suministrada al transductor.



**Figura 4.1.3.** Intensidad y voltaje de la señal eléctrica que excita el transductor ultrasónico (90 W), secado de láminas de corteza de limón a 40 °C y 1 m/s. Intervalo entre medidas 2 minutos.

Para una potencia eléctrica aplicada similar (90 W), el voltaje de la señal eléctrica fue ligeramente inferior en las experiencias de secado respecto al medido en las pruebas de caracterización previa (60 V). Por lo tanto, la intensidad fue mayor: 1.7-1.9 A en las experiencias de secado frente a los 1.55 A medidos durante la caracterización. Este hecho se debe traducir en un aumento de la energía ultrasónica radiada por el cilindro ya que la amplitud en la vibración de las cerámicas es proporcional a la intensidad eléctrica. Un aumento de la amplitud de vibración de las cerámicas supone una mayor amplitud de vibración en el cilindro y, por tanto, una mayor cantidad de energía acústica radiada a la cámara de secado. En consecuencia, respecto a la intensidad el funcionamiento del transductor es mejor cuando existe flujo de aire ya que éste posibilita la refrigeración de las paredes del cilindro evitando su sobrecalentamiento. Sin embargo, este efecto se encuentra condicionado por la propia temperatura del aire de secado, ya que en aquellos casos donde se utilicen altas temperaturas, el efecto de refrigeración puede no darse.

En conjunto, el sistema de aplicación ultrasónico mostró un comportamiento adecuado durante las experiencias de secado, por tanto, su instalación en el secadero convectivo se puede considerar satisfactoria. Unas condiciones de trabajo inadecuadas podrían disminuir la energía radiada por el sistema y producir el envejecimiento de las cerámicas piezoeléctricas, lo que conllevaría a una reducción de la vida útil del equipo.

**4.2. ISOTERMAS DE SORCIÓN DE CORTEZA DE LIMÓN**

**4.2.1. Datos experimentales. Influencia de la temperatura.**

Las isotermas experimentales de corteza de limón, determinadas a 20, 30, 40 y 50 °C, se muestran en la Figura 4.2.1. El rango de datos estudiado osciló entre 0.843 y 0.001 kg w/kg producto para el contenido de humedad y entre 0.984 y 0.106 para la actividad de agua. Las curvas mostraron una forma tipo III (Samaniego-Esguerra et al., 1991) característica de productos que retienen pequeñas cantidades de agua a bajos niveles de actividad de agua y grandes cuando son expuestos a elevadas humedades relativas.

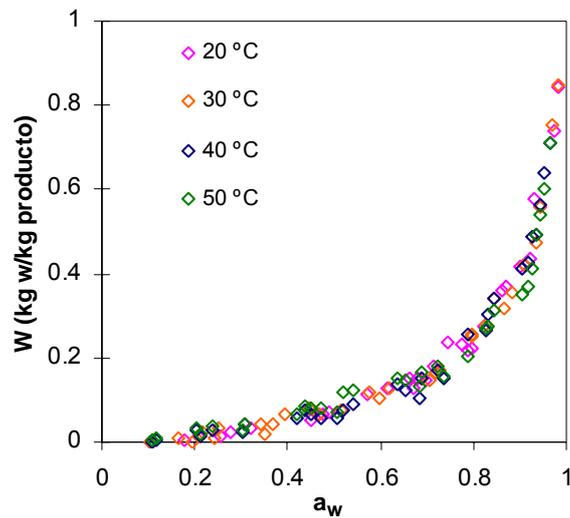
Para realizar un estudio más en profundidad de los datos experimentales se utilizó el modelo de GAB. Así, para cada temperatura ensayada se identificaron los parámetros del modelo ( $C_G$ ,  $K_G$  y  $W_m$ ) (Tabla 4.2.1).

T (°C)	$W_m$ (kg w/kg ms)	$C_G$	$K_G$	VAR (%)
20	0.064	4.88	1.00	98.9
30	0.069	1.37	1.01	99.7
40	0.062	2.30	1.01	99.0
50	0.049	4.50	1.02	98.8

**Tabla 4.2.1. Parámetros del modelo de GAB identificados.**

A partir de la modelización se puede identificar la influencia de la temperatura en el proceso. Tal y como se muestra en la Figura 4.2.2, para un mismo nivel de humedad, la actividad de agua calculada aumentó a medida que se incrementó la temperatura, lo que supone un comportamiento típico de los alimentos. El contenido de humedad de la monocapa ( $W_m$ ) identificado fue similar a las temperaturas de 20, 30, 40 °C (Tabla 4.2.1), pero disminuyó a 50 °C. Según algunos autores, la explicación a este hecho podría ser que las moléculas de agua tomen más de un sitio activo a altas temperaturas por el aumento de la energía cinética (Diosady et al., 1996). Aunque la hipótesis más usualmente adoptada es

que en general los sitios de adsorción activos son fijos. Esta teoría podría explicar el descenso de  $W_m$  a 50 °C.



**Figura 4.2.1. Isotermas de sorción experimentales de corteza de limón obtenidas a diferentes temperaturas.**

Los valores de  $K_G$  obtenidos fueron cercanos a 1, lo que indica que las propiedades de la multicapa fueron muy similares a las propiedades de las moléculas del agua pura. Teniendo esto en cuenta, el calor isostérico de sorción se debería aproximar bastante al calor latente de vaporización con contenidos de humedad elevados (Lewicki, 1998). Garau et al. (2006) encontraron valores similares de los parámetros de GAB en la modelización de la isoterma de sorción de corteza de naranja determinada a 25 °C ( $W_m = 0.085$  kg w/kg ms,  $C_G = 2.374$ ,  $K_G = 0.982$ ). No se han encontrado más referencias bibliográficas sobre isotermas de sorción de corteza de cítricos. Lahsasni et al. (2002) determinaron isotermas de desorción y adsorción de piel de higo chumbo. A partir del modelo de GAB identificaron un valor de la monocapa ligeramente inferior al obtenido en este trabajo (0.0274 - 0.0221 kg w/kg ms).

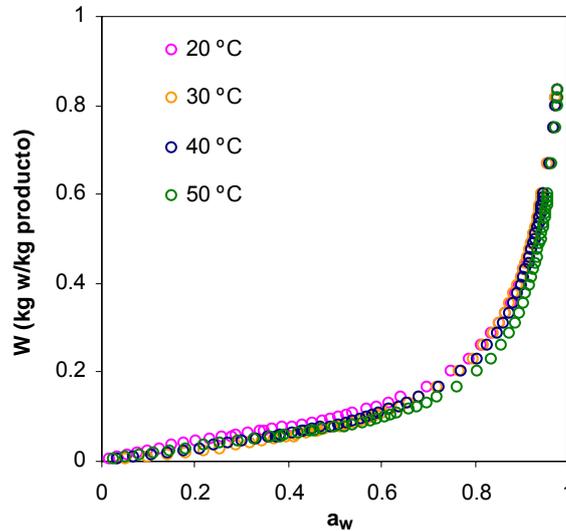


Figura 4.2.2. Isothermas calculadas con el modelo de GAB.

#### 4.2.2. Modelización incluyendo el efecto de la temperatura

Los resultados anteriormente expuestos sugieren que podría ser conveniente considerar el efecto de la temperatura en el modelo de las isothermas de sorción de corteza de limón. Para ello, se utilizaron diferentes modelos matemáticos en los que se incluyó el efecto de la temperatura: GAB (Ec. 1.1.3), Oswin (Ec. 1.1.6), Henderson (Ec. 1.1.7), Halsey (Ec. 1.1.8) y Ratti (Ec. 1.1.9). Para la identificación paramétrica, se incluyeron de forma conjunta las 4 series de datos experimentales independientes obtenidas a cada temperatura (20, 30, 40 y 50 °C). En vistas a seleccionar el modelo más útil para la modelización se determinó la bondad de los ajustes conseguidos calculando diferentes parámetros, entre los que se encuentran la varianza explicada, la distribución de residuos, el número de parámetros de ajuste del modelo y su significado físico. El modelo ideal debería presentar un valor elevado de varianza explicada, identificar pocos parámetros simultáneamente y además que éstos tuvieran significado físico y, por último, presentar una distribución aleatoria de residuos.

Valores identificados en bibliografía para los diferentes parámetros de estos modelos (Mulet et al., 2002a; Garau et al., 2006) se utilizaron como valores iniciales de la identificación paramétrica. En la identificación de los 5 parámetros del modelo de GAB ( $W_m$ ,  $C_0$ ,  $\Delta H_c$ ,  $K_0$ ,  $\Delta H_k$ ) se consideraron en los valores iniciales a los parámetros identificados previamente sin incluir el efecto de la temperatura ( $W_m$ ,  $C$  y  $K$ , Tabla 4.2.1).

Los parámetros identificados de los diferentes modelos se muestran en la Tabla 4.2.2. Los modelos de GAB y Ratti fueron los que consiguieron los mayores valores de la varianza explicada (> 99 %) (Tabla 4.2.2). Los modelos de Oswin y Henderson ajustaron peor los datos experimentales, con varianzas explicadas por debajo del 97.5 %. La varianza explicada por el modelo de Halsey se situó entre estos dos grupos (VAR = 98.4 %). En la Figura 4.2.3 se comparan las isothermas calculadas para los modelos de GAB, Halsey y Henderson para los datos experimentales determinados a 30 °C. En el Anejo 1 en las Figuras A1.1, A1.2 y A1.3 se muestran las mismas curvas para el resto de temperaturas experimentales.

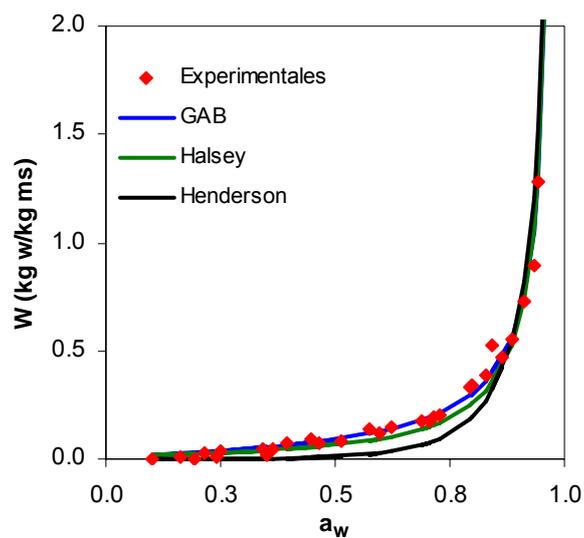
Modelos	Parámetros identificados					VAR (%)	Residuos
<b>GAB</b>	$W_m$ 0.065	$C_0$ 1.0	$\Delta H_c$ 118.8	$K_0$ 1.1	$\Delta H_k$ -14.9	99.3	Aleatorios
<b>Oswin</b>	$A_{OS}$ 0.1	$B_{OS}$ $-8.6 \cdot 10^{-5}$	$C_{OS}$ 1.1			97.4	Aleatorios
<b>Henderson</b>	$A_H$ $6.7 \cdot 10^{-4}$	$B_H$ 0.3	$C_H$ 3502.0			96.4	Con tendencia
<b>Halsey</b>	$A_{Ha}$ 0.8	$B_{Ha}$ $8 \cdot 10^{-3}$	$C_{Ha}$ -5.1			98.4	Aleatorios
<b>Ratti</b>	$k_1$ $8.4 \cdot 10^{-2}$	$k_2$ -0.9	$k_3$ $1.2 \cdot 10^{-3}$	$k_4$ 42.5	$k_5$ -0.9	99.8	Aleatorios

**Tabla 4.2.2. Modelización de las isothermas de sorción de corteza de limón incluyendo el efecto de la temperatura en los modelos.**

Como ya se ha indicado anteriormente, un factor para evaluar la utilidad de los modelos es el número de parámetros implicados. Un bajo número de parámetros en la modelización, no sólo simplifica el procedimiento de cálculo, si no que también hace que los valores obtenidos sean más fiables. Este aspecto es

importante cuando el modelo es usado en el diseño de procesos de secado. Como se observa en la Tabla 4.2.2 los modelos que proporcionan un mayor porcentaje de varianza explicada, Ratti y GAB, son los que presentan un mayor número de parámetros a identificar, 5. En el caso del modelo de GAB al incluir el efecto de la temperatura, se pasa de estimar 3 a 5 parámetros. Por otra parte, los grados de libertad de la identificación aumentan al utilizar todos los datos experimentales disponibles a las diferentes temperaturas (4 series de datos independientes).

De entre los modelos con pocos parámetros a estimar destaca el modelo de Halsey, ya que con únicamente tres parámetros, proporciona un varianza explicada elevada. Por esta razón, el modelo de Halsey puede ser útil en aquellas aplicaciones que se considere necesaria una mayor simplicidad de cálculo.



**Figura 4.2.3. Modelización de la isoterma de sorción de corteza de limón a 30 °C con los modelos de GAB, Halsey y Henderson.**

En cuanto a la distribución de residuos, ésta fue aleatoria para todos los modelos excepto para el modelo de Henderson (Figuras 4.2.4 y 4.2.5, A1.4, A1.5 y A1.6). En la Figura 4.2.5 se puede observar que los valores calculados con el modelo de Henderson son siempre inferiores a los valores experimentales para

actividades de agua por debajo de 0.8. Únicamente los errores son aleatorios para altos valores de actividad de agua. Por el contrario, el resto de modelos los residuos son aleatorios en todo el rango de actividad de agua evaluado. La tendencia observada en la distribución de residuos descarta al modelo de Henderson para utilizarlo en la modelización de las isothermas de sorción de corteza de limón.

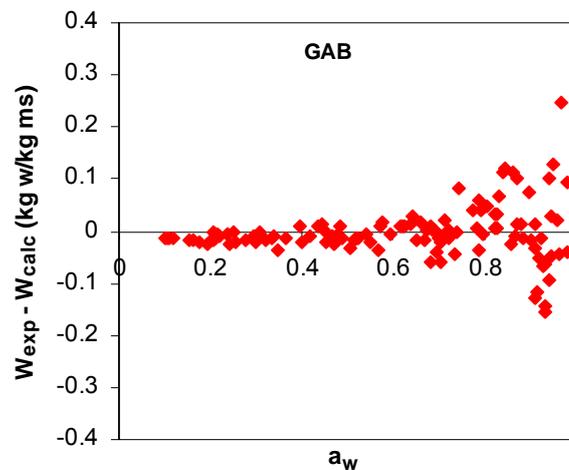
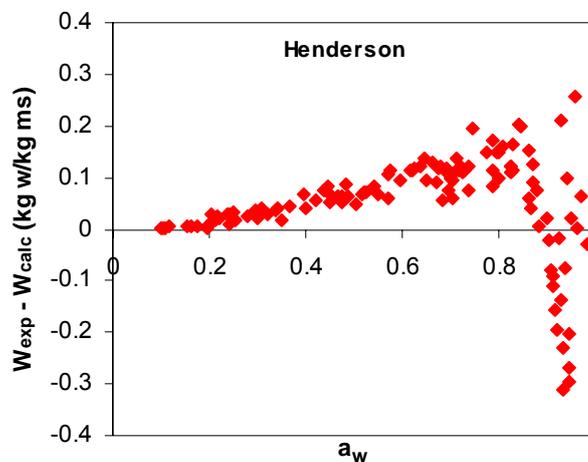


Figura 4.2.4. Distribución de residuos obtenidos con el modelo de GAB. Datos experimentales a todas las temperaturas (20, 30, 40 y 50 °C).

Otro factor a considerar en la evaluación de los distintos modelos es el significado físico de sus parámetros. Así, el significado físico de los parámetros del modelo de GAB constituye una base que permite comparar con los diferentes materiales. El valor de la humedad de monocapa ( $W_m$ ) fue muy similar a los obtenidos por el modelo de GAB aplicado a cada temperatura individualmente (Tabla 4.2.1). Los valores de  $\Delta H_C$  y  $\Delta H_K$  muestran el grado de interacción de las moléculas de agua con la matriz sólida. El valor positivo de  $\Delta H_C$  (111.8 kJ/kg) indica que la energía de enlace entre las moléculas de agua en la monocapa y la matriz sólida fue más alta que para las moléculas de agua en la multicapa. El valor negativo de  $\Delta H_K$  (-14.84 kJ/kg) encontrado sugiere que la energía de enlace en la multicapa fue ligeramente más alta que la energía de vaporización del agua pura.

A partir los valores de  $W_m$ ,  $\Delta H_C$  y  $\Delta H_K$  se puede estimar el calor isostérico de sorción para el contenido de humedad de la monocapa: 2389 kJ/kg. Este resultado se comparará posteriormente con los obtenidos en el análisis del calor isostérico de sorción.

Los parámetros de los otros modelos (Oswin, Henderson, Halsey y Ratti) no tienen un significado físico tan explícito como el modelo de GAB ya que son todos modelos empíricos.



**Figura 4.2.5. Distribución de los residuos obtenidos con el modelo de Henderson. Datos experimentales a todas las temperaturas (20, 30, 40 y 50 °C).**

En base a los resultados obtenidos de la modelización, parece que el modelo de GAB es el más adecuado para describir las isothermas de sorción de corteza de limón. Este modelo proporcionó una elevada varianza explicada, una distribución de residuos aleatoria y a partir de sus parámetros identificados se puede obtener información útil sobre el proceso de sorción. El único inconveniente de este modelo lo constituyen los 5 parámetros que se identifican simultáneamente. Como ya se comentó, en aquellos casos en los que un bajo número de parámetros sea requerido por necesidades de cálculo, el modelo de Halsey podría considerarse como una buena alternativa al modelo de GAB.

### **4.2.3. Calor isostérico de sorción**

El calor isostérico de sorción de la corteza de limón fue determinado a partir de las isothermas de sorción obtenidas a las diferentes temperaturas experimentales. Los errores asociados al trabajo experimental, junto con la variabilidad natural de la materia prima, constituyen la principal desventaja de este método de determinación comparado con los métodos calorimétricos (Chirife e Iglesias, 1992). Estos últimos constituyen una buena alternativa si se dispone de la instrumentación adecuada (Mulet et al., 1999a).

El calor isostérico fue determinado a partir de la ecuación de Clausius-Clapeyron (Ec. 1.1.11) usando los métodos de cálculo diferencial e integral (Ec. 3.2.1) descritos anteriormente (Apartado 3.2.2.6). Las isothermas de sorción estimadas con el modelo de GAB a temperatura constante (Tabla 4.2.1 y Figura 4.2.2) se utilizaron para estimar, por interpolación, los valores de actividad de agua a las diferentes temperaturas experimentales para un contenido constante de humedad. En el caso del método integral, el cálculo se realizó con las curvas calculadas con el modelo de GAB para las temperaturas de 20 y 50 °C.

En la Figura 4.2.6 se muestra la influencia del contenido de humedad en el calor isostérico de sorción obtenido con los diferentes métodos de cálculo. Tal y como cabía esperar, el calor isotérico de sorción disminuyó a medida que aumentó el contenido de humedad y, a partir de valores superiores a 1 kg w/kg ms, su valor se aproximó mucho al calor latente de vaporización.

Las estimaciones obtenidas a partir de los métodos de cálculo diferencial e integral son similares. De hecho, con contenidos de humedad elevados son prácticamente iguales, mientras que las diferencias se incrementan a medida que disminuye el contenido de humedad. Estos resultados coinciden con los mostrados en la bibliografía sobre la proximidad entre las estimaciones del calor isostérico de sorción obtenidas con ambos métodos (Mulet et al., 1999a; Mulet et al., 2002a).

El calor isostérico neto de sorción fue también calculado a partir de la expresión de Riedel (Ec. 3.2.2 y Ec. 3.2.3) (Apartado 3.2.2.6). Los parámetros identificados de la Ec. 3.2.2 fueron  $B_r = 8.02 \text{ kg ms/kg w}$  y  $A_r = 1532.08 \text{ K}$  utilizando los datos de las isothermas obtenidas a 20 y 50 °C. El porcentaje de varianza explicada obtenido fue del 97.7 %. Mulet et al. (2002a) estimaron valores similares para las isothermas de sorción de *Morchella esculenta*. Los calores isostéricos de sorción obtenidos a partir de la Ec. 3.2.3, usando los valores identificados de  $A_r$  y  $B_r$ , fueron cercanos a los valores calculados con los métodos diferencial e integral (Figura 4.2.6) a contenidos de humedad elevados. Sin embargo, los valores estimados con el método de Riedel se aproximaron al calor latente de vaporización ( $L_r$ ) a menores contenidos de humedad (0.5 kg w/kg ms) que en los métodos diferencial e integral (Figura 4.2.6).

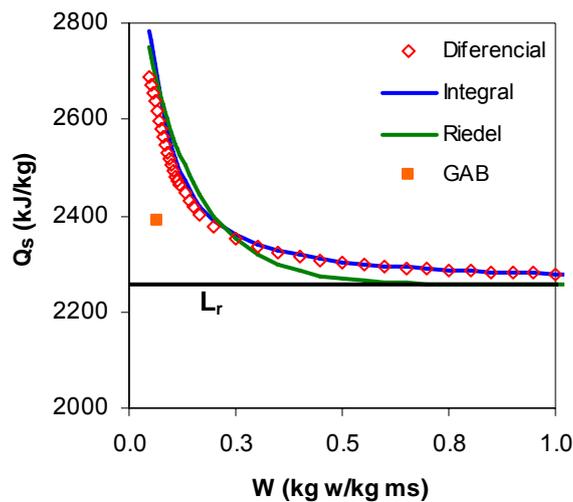


Figura 4.2.6. Influencia del contenido de humedad en el calor isostérico de sorción de corteza de limón identificado por diferentes métodos.

Como anteriormente se ha indicado, a partir del modelo de GAB se identificaron el contenido de humedad de la monocapa ( $W_m = 0.065 \text{ kg w/kg ms}$ ) y la energía asociada a ese contenido de humedad ( $H_m = 2389 \text{ kJ/kg}$ ). El valor del calor isostérico neto de sorción así identificado varió un  $66.7 \pm 3.2 \%$  respecto a las

estimaciones obtenidas usando los modelos de Clausius-Clapeyron y Riedel para ese mismo contenido de humedad. Chirife e Iglesias (1992) sugieren que la variabilidad de los datos experimentales puede introducir variaciones en la estimación del calor isostérico neto de sorción usando la ecuación de Clausius-Clapeyron que pueden llegar hasta el 100 %. Por lo tanto, para calcular el calor isostérico de sorción a partir de las isotermas, se requiere un trabajo experimental muy preciso debido a la gran cantidad de errores asociados a los datos de sorción (Chirife e Iglesias, 1992). Esto presenta una variabilidad añadida a la inherente de los productos naturales.

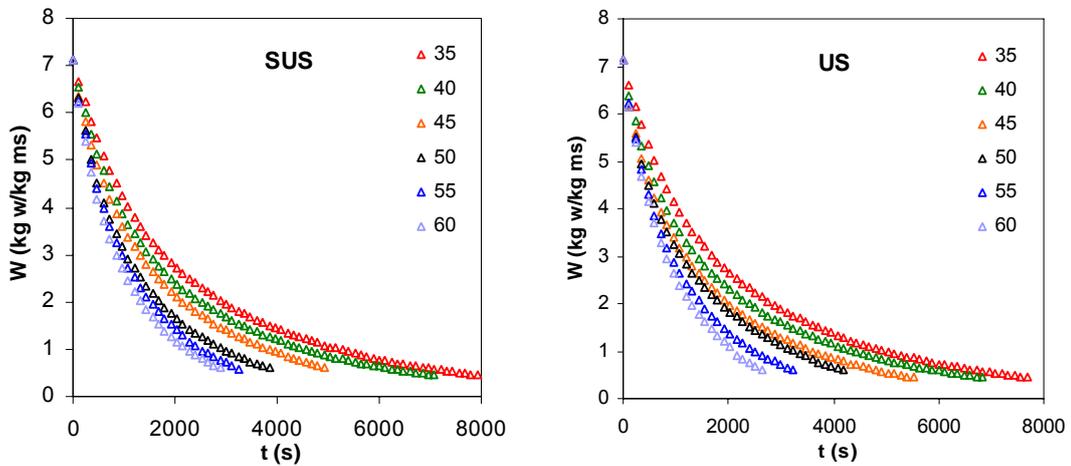
### **4.3. SECADO EN LECHO FLUIDIZADO ASISTIDO POR ULTRASONIDOS DE POTENCIA**

A continuación se muestran los resultados obtenidos en las experiencias de secado en lecho fluidizado de zanahoria y albaricoque realizadas a diferentes temperaturas experimentales (30, 35, 40, 45, 50, 55 y 60 °C). Se incluyen los resultados de la modelización de las cinéticas experimentales de secado con los modelos difusionales y el modelo de Weibull, así como la estimación de la energía de activación.

#### **4.3.1. Secado de zanahoria y albaricoque en lecho fluidizado**

En la Figura 4.3.1 se muestran las cinéticas de secado de cubos de zanahoria (8.5 mm de lado) sin (SUS) y con aplicación de ultrasonidos de potencia (US, 75 W, 21.7 kHz). Por otro lado, en la Figura 4.3.2 se pueden observar las cinéticas obtenidas en el caso del secado en lecho fluidizado de octavos de albaricoque. En ambos casos, zanahoria y albaricoque, la velocidad del aire utilizada varió entre 10 y 14 m/s en función del grado de humedad de las muestras. Las experiencias de secado se realizaron al menos por triplicado para cada una de las distintas condiciones experimentales ensayadas.

La humedad inicial de los albaricoques fue de  $6.66 \pm 0.76$  kg w/kg ms. Este valor es similar a los obtenidos por Berna et al. (1990), Abdelhaq y Labuza (1987), Togrul y Pehlivan (2003). Para el lote de zanahorias, la humedad inicial fue de  $7.13 \pm 0.16$  kg w/kg ms, valor similar a los citados para este producto en la bibliografía (Ruiz-López et al., 2004; Srikiatden y Roberts, 2006). El secado de ambos productos transcurrió en el periodo de velocidad decreciente, por lo que la humedad crítica se correspondió con la humedad inicial (Figuras A2.1, A2.2, A2.3 y A2.4) (Karathanos y Belesiottis, 1997).



**Figura 4.3.1. Secado de cubos de zanahoria (8.5 mm de lado) en lecho fluidizado (10-14 m/s) a diferentes temperaturas (°C) sin (SUS) y con (US, 75 W, 21.7 kHz) aplicación de ultrasonidos.**

La influencia de la temperatura en las cinéticas de secado de estos productos siguió el comportamiento usual de este parámetro en los alimentos, es decir, a medida que aumentó la temperatura se produjo un incremento de la velocidad de secado (Figuras A2.1, A2.2, A2.3 y A2.4), y por tanto una reducción del tiempo de secado. El efecto de la temperatura fue similar en las experiencias SUS y US.

A partir de las cinéticas de secado no se aprecia ningún efecto de los ultrasonidos de potencia en el secado de zanahoria y albaricoque en estas condiciones experimentales (Figuras 4.3.1 y 4.3.2). Como se muestra en la Figura 4.3.3 las cinéticas US y SUS obtenidas a diferentes temperaturas presentan unas diferencias mínimas y atribuibles, en todo caso, a errores experimentales o a la propia heterogeneidad de la materia prima y en ningún caso al efecto de los ultrasonidos de potencia. Este hecho debe corroborarse a partir de la modelización de las cinéticas de secado.

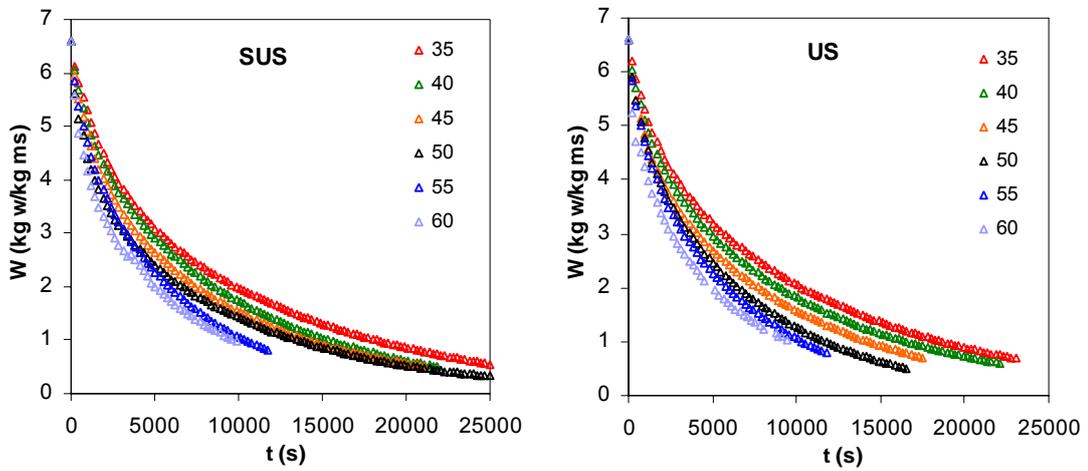


Figura 4.3.2. Secado de octavos de albaricoque en lecho fluidizado (10-14 m/s) a diferentes temperaturas (°C) sin (SUS) y con (US, 75 W, 21.7 kHz) aplicación de ultrasonidos.

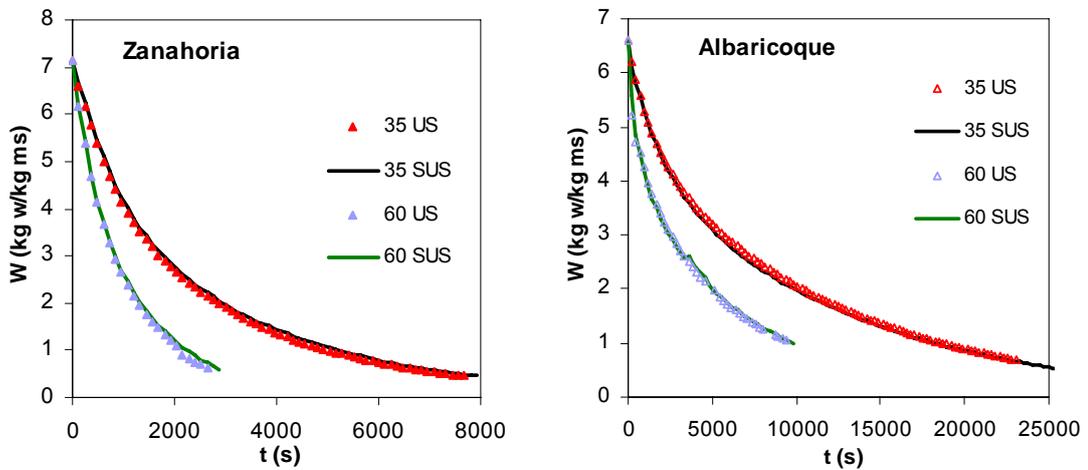


Figura 4.3.3. Influencia de la aplicación de ultrasonidos de potencia en el secado en lecho fluidizado (10-14 m/s) de zanahoria y albaricoque.

**4.3.2. Modelos SRE. Secado en lecho fluidizado**

Las cinéticas de secado en lecho fluidizado de zanahoria y albaricoque fueron modelizadas teniendo en cuenta la teoría difusional. Los modelos difusionales utilizados fueron diferentes debido a la geometría de ambos productos. En el caso de la zanahoria se utilizó un modelo difusional para una geometría cúbica (Ec. 3.6.10) de 8.5 mm de lado (2L). Por otro lado, los albaricoques cortados en octavos se modelizaron suponiendo que la piel de los albaricoques es prácticamente impermeable a la transferencia de agua (Mulet et al., 2005) y como consecuencia, considerando que su comportamiento se asemeja al de una lámina infinita (Ec. 3.6.7) de semiespesor igual al espesor real de los albaricoques, L = 10 mm. En ambos modelos difusionales planteados no se tuvo en cuenta la resistencia externa a la transferencia de materia (modelos SRE) ya que la velocidad de aire utilizada en las experiencias de lecho fluidizado fue muy elevada (10-14 m/s). En estas condiciones de flujo, es habitual despreciar la resistencia externa a la transferencia de materia (Mulet, 1994; Sanjuán, 1998; Blasco et al., 2006). Tanto para la zanahoria como para el albaricoque, solamente se identificó un único periodo difusional (Figura A2.5).

T (°C)	US		SUS	
	D <sub>e</sub> (10 <sup>-10</sup> m <sup>2</sup> /s)	VAR (%)	D <sub>e</sub> (10 <sup>-10</sup> m <sup>2</sup> /s)	VAR (%)
35	5.70±0.32	94.3	6.07±0.72	93.9
40	6.96±0.25	98.1	6.38±1.93	96.8
45	7.51±0.48	98.4	7.16±1.29	97.0
50	8.38±0.20	97.5	8.54±0.61	97.0
55	9.92±0.96	96.9	9.52±1.10	96.3
60	11.40±0.55	95.7	11.30±0.89	95.9

**Tabla 4.3.1. Modelización de las cinéticas de secado en lecho fluidizado de zanahoria. Modelo SRE para geometría cúbica.**

Los valores medios de difusividad efectiva identificados (Tablas 4.3.1 y 4.3.2) para la zanahoria (entre 5.70x10<sup>-10</sup> y 11.40x10<sup>-10</sup> m<sup>2</sup>/s) y para el albaricoque

(entre  $4.90 \times 10^{-9}$  y  $8.64 \times 10^{-9}$   $m^2/s$ ) se encuentran dentro del intervalo considerado como más usual en los alimentos ( $10^{-10}$  y  $10^{-8}$   $m^2/s$ ) (Zogzas et al., 1996). En el caso de la zanahoria, los valores son similares a los mostrados en la bibliografía por Mulet et al. (1989a), Ruiz-López et al. (2004) y Srikiatden y Roberts (2006). Por otro lado, para albaricoco los valores de difusividad efectiva están dentro del orden ( $10^{-9}$   $m^2/s$ ) de los presentados por Berna et al. (1990) para el secado convectivo de albaricoques cortados por la mitad y Togrul y Pehlivan (2003) en el caso de piezas enteras.

Los valores de difusividad efectiva identificados de ambos productos se vieron afectados de forma significativa ( $p < 0.05$ ) por la temperatura de secado. A medida que la temperatura del aire de secado aumentó, la difusividad efectiva identificada se incrementó. El efecto de la temperatura de secado en la difusividad efectiva ha sido mostrado en multitud de ocasiones en la bibliografía

Por otra parte, los resultados mostrados en las Tablas 4.3.1 y 4.3.2 sugieren que los ultrasonidos de potencia no influyeron de forma significativa ( $p < 0.05$ ) en los valores de difusividad efectiva identificados para ambos productos. No se apreció ninguna tendencia que diferencie los valores identificados en las experiencias US y SUS. Las diferencias entre los valores fueron mínimas y no atribuibles en ningún caso a la aplicación de ultrasonidos.

T (°C)	US		SUS	
	$D_e$ ( $10^{-9} m^2/s$ )	VAR (%)	$D_e$ ( $10^{-9} m^2/s$ )	VAR (%)
35	4.90±0.26	99.6	5.03±0.45	99.7
40	5.71±0.56	99.5	5.70±0.63	99.5
45	6.45±0.67	99.2	6.18±0.41	99.3
50	7.45±0.17	99.8	7.35±0.23	99.8
55	8.35±0.45	99.5	8.28±0.39	99.1
60	8.64±0.21	99.1	8.59±0.87	99.5

Tabla 4.3.2. Modelización de las cinéticas de secado en lecho fluidizado de octavos de albaricoco. Modelo SRE para geometría de lámina infinita.

La bondad de los ajustes obtenidos entre los valores experimentales y los calculados con los modelos difusionales planteados fue diferente para ambos productos. En el caso del albaricoque, los porcentajes de varianza explicada fueron en todos los casos superiores al 99 %. Es decir, en este caso, el modelo de lámina infinita planteado describió muy bien los datos experimentales. Por el contrario, en el caso de la zanahoria la varianza explicada fue en algunos casos inferior al 94 % (Tabla 4.3.1), lo que sugiere una peor aproximación entre los valores experimentales y calculados por el modelo. Estos resultados no serían atribuibles al hecho de no considerar la resistencia externa en la modelización, ya que como anteriormente se ha indicado, en estas condiciones experimentales de elevada velocidad del aire (entre 10 y 14 m/s) la influencia de la resistencia externa es pequeña y a efectos prácticos despreciable. De cara a obtener modelos más adecuados para describir el comportamiento de la zanahoria durante el secado, sería necesario tener en cuenta el efecto de otras variables, como el encogimiento (Mulet et al., 1989a; Ben-Mabrouk y Belghith, 1995; Hatamipour y Mowla, 2002; Ruiz-López et al., 2004), que han sido consideradas en la bibliografía para la modelización de este producto. Sin embargo, el objetivo perseguido en este trabajo con la modelización de las cinéticas de secado fue el identificar el efecto de los ultrasonidos de potencia en los procesos de transferencia de materia, y no tanto desarrollar modelos muy precisos en la descripción de las cinéticas de secado. Por esta razón, no se plantearon modelos difusionales más complejos para describir las cinéticas de secado de la zanahoria. Aunque, sí se utilizó un modelo empírico para contrastar los resultados obtenidos.

#### **4.3.3. Modelo de Weibull. Secado en lecho fluidizado**

El modelo empírico de Weibull se utilizó para modelizar las cinéticas de secado en lecho fluidizado de zanahoria y albaricoque (Tablas 4.3.3 y 4.3.4). El objetivo fue comparar los resultados obtenidos con los modelos difusionales con un modelo empírico de amplia utilización y examinar el efecto de los ultrasonidos.

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

T (°C)	US			SUS		
	$\alpha$	$\beta$ (10 <sup>3</sup> s)	VAR (%)	$\alpha$	$\beta$ (10 <sup>3</sup> s)	VAR (%)
35	0.91±0.10	2.14±0.14	99.9	0.88±0.07	2.01±0.11	99.9
40	0.81±0.18	1.71±0.07	99.8	0.85±0.11	1.90±0.10	99.9
45	0.76±0.13	1.60±0.07	99.9	0.82±0.09	1.70±0.13	99.9
50	0.79±0.04	1.41±0.06	99.9	0.78±0.03	1.41±0.10	99.9
55	0.79±0.05	1.21±0.11	99.9	0.81±0.06	1.26±0.13	99.9
60	0.83±0.06	1.05±0.06	99.9	0.82±0.05	1.07±0.09	99.9

**Tabla 4.3.3. Modelización de las cinéticas de secado en lecho fluidizado de zanahoria. Modelo de Weibull.**

T (°C)	US			SUS		
	$\alpha$	$\beta$ (10 <sup>3</sup> s)	VAR (%)	$\alpha$	$\beta$ (10 <sup>3</sup> s)	VAR (%)
35	0.74±0.02	7.61±0.23	99.9	0.75±0.03	7.11±0.23	99.8
40	0.71±0.04	6.29±0.19	99.9	0.71±0.01	6.27±0.31	99.9
45	0.69±0.03	5.83±0.04	99.7	0.67±0.03	5.70±0.15	99.9
50	0.74±0.04	4.85±0.14	99.8	0.72±0.08	4.75±0.20	99.8
55	0.71±0.04	4.33±0.33	99.8	0.71±0.06	4.47±0.05	99.7
60	0.67±0.04	4.25±0.47	99.8	0.71±0.02	4.10±0.15	99.8

**Tabla 4.3.4. Modelización de las cinéticas de secado en lecho fluidizado de albaricoque. Modelo de Weibull.**

Tanto para las experiencias de secado de zanahoria como de albaricoque, el parámetro  $\beta$  del modelo de Weibull se vio afectado de forma significativa ( $p < 0.05$ ) por la temperatura de secado. A medida que la temperatura de secado aumentó, el valor identificado de este parámetro se redujo, inversamente a la velocidad de secado (Cunha et al., 1998). Este mismo efecto de la temperatura sobre el parámetro  $\beta$  ha sido mostrado anteriormente por otros autores en diversos productos (Cunha et al., 2001; Blasco et al., 2006). Uno de los principales inconvenientes de los parámetros cinéticos de los modelos empíricos es que son difícilmente comparables con los mostrados en otros trabajos. Únicamente se pueden comparar valores identificados siguiendo el mismo procedimiento

experimental y con el mismo tipo de materia prima, ya que los parámetros empíricos se ven afectados por todas las variables que influyen en la velocidad de secado, como por ejemplo la geometría de la materia prima (tamaño y forma).

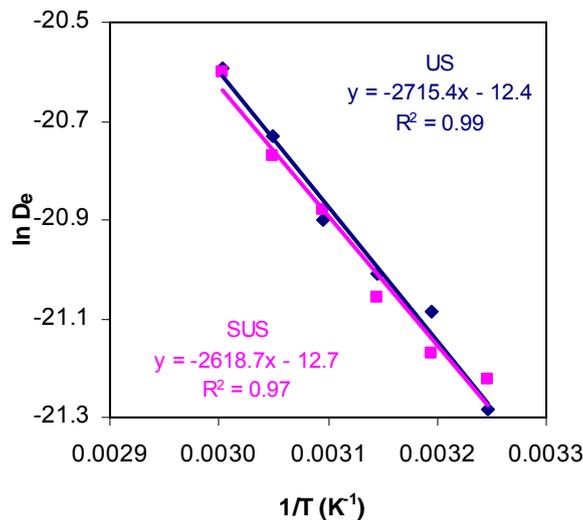
A diferencia de lo que ocurre con el parámetro  $\beta$ , el parámetro  $\alpha$  no se vio afectado de forma significativa ( $p < 0.05$ ) por la temperatura de secado (Tabla 4.3.3 y 4.3.4). Como anteriormente se ha indicado, este parámetro se considera como una característica del material que determina su comportamiento durante el secado. Por lo tanto, las características de la zanahoria y el albaricoque durante el secado no se vieron afectadas por la temperatura. La bibliografía resulta un poco confusa en determinar el efecto de la temperatura sobre el parámetro  $\alpha$ . Se han encontrado trabajos que consideran despreciable la influencia de la temperatura en este parámetro (Cunha et al., 1998; Cunha et al., 2001; Simal et al., 2005a; Blasco et al., 2006), así como también otros que consideran su influencia significativa (Senadeera et al., 2003; Simal et al., 2005c).

Al igual que ocurrió en el caso de la difusividad efectiva de los modelos difusionales, el parámetro  $\beta$  no se vio afectado de forma significativa ( $p < 0.05$ ) por la aplicación de ultrasonidos de potencia. Por lo tanto, el uso de un modelo que ajusta mejor los datos experimentales no conduce a una conclusión diferente en este aspecto. Es decir, se confirma que la velocidad de secado en la zanahoria y el albaricoque en condiciones de lecho fluidizado no se vio influenciada por la aplicación de ultrasonidos de potencia.

El modelo de Weibull ajustó bien las cinéticas de secado de ambos productos. En todos los casos, la varianza explicada fue superior al 99 %, lo que revela una elevada proximidad entre los valores experimentales y los calculados con este modelo.

**4.3.4. Estimación de la energía de activación. Secado en lecho fluidizado**

La relación de los parámetros cinéticos de los modelos con la temperatura del aire de secado sigue en muchos casos la ecuación de Arrhenius (Ec. 3.6.13 y 3.6.14). A partir de la representación del logaritmo neperiano de los valores de difusividad efectiva identificados, o el parámetro  $1/\beta$  de Weibull, frente a la inversa de la temperatura se puede obtener una estimación de la energía de activación, y por lo tanto, cuantificar la influencia de la temperatura del aire en la cinética de secado.



**Figura 4.3.4. Variación de la difusividad efectiva con la temperatura. Secado de cubos de zanahoria en lecho fluidizado.**

En las Figuras 4.3.4, 4.3.5, A2.6 y A2.7 se muestra cómo la evolución de los parámetros cinéticos de los modelos se ajusta aceptablemente a la ecuación de Arrhenius. A partir de la pendiente de esa recta se obtuvo el valor de la energía de activación (Tabla 4.3.5). Las relaciones lineales mostradas en las Figuras 4.3.4, 4.3.5, A2.6 y A2.7 no son significativamente diferentes para las experiencias US y SUS, lo que muestra, una vez más, la ausencia de cualquier tipo de efecto de los

ultrasonidos de potencia en las cinéticas de secado realizadas en lecho fluidizado de zanahoria y albaricoque.

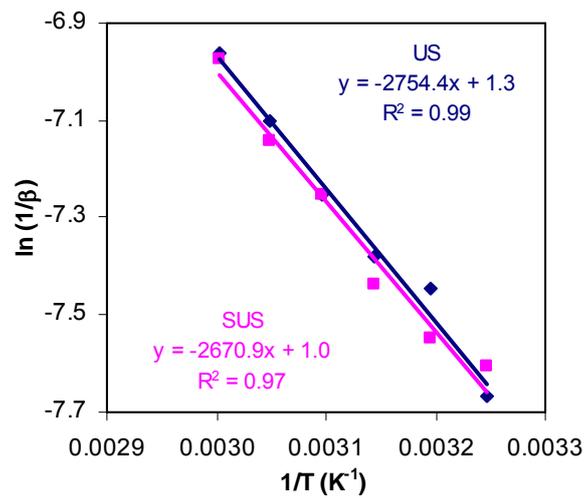


Figura 4.3.5. Variación de la inversa del parámetro  $\beta$  de Weibull con la temperatura. Secado de cubos de zanahoria en lecho fluidizado.

	Weibull		Difusional	
	SUS	US	SUS	US
Zanahoria	22.2±5.8	22.9±4.4	21.8±5.8	22.6±4.2
Albaricoque	19.4±3.6	20.7±6.1	19.4±4.3	20.1±4.4

Tabla 4.3.5. Energía de activación (kJ/mol) identificada a partir de los modelos difusional SRE y Weibull, experiencias SUS y US de zanahoria y albaricoque.

Los valores de energía de activación identificados para la zanahoria y los albaricoques (Tabla 4.3.5) son similares a los mostrados en la bibliografía para estos productos (Tabla A2.1). Las diferencias entre las energías de activación estimadas con el modelo difusional y de Weibull no son significativas, tal y como era esperado, ni tampoco las diferencias debidas a la aplicación de ultrasonidos.

#### **4.4. INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DEL AIRE EN EL SECADO ASISTIDO POR ULTRASONIDOS DE POTENCIA**

A partir de las experiencias realizadas en lecho fluidizado se evidenció que los ultrasonidos de potencia no producían ningún efecto en las cinéticas de secado de zanahoria y albaricoque en condiciones de velocidad de aire elevada. Teniendo en cuenta estos resultados, así como las referencias bibliográficas consultadas, se consideró que la velocidad del aire es una de las variables que podría influir en la aplicación de ultrasonidos de potencia durante el secado.

Por lo tanto, en un primer lugar, se realizaron ensayos para determinar la influencia de la velocidad del aire en la intensidad y estructura del campo acústico generado por el sistema de aplicación de ultrasonidos de potencia.

En un segundo lugar, se plantearon experiencias de secado con diferentes productos y diferentes geometrías llevadas a cabo en un amplio rango de velocidades de aire (0.5-12 m/s) con (US) y sin (SUS) aplicación de ultrasonidos de potencia. A partir de estas cinéticas, se pretendió evaluar tanto la influencia de la velocidad del aire en el secado acústico como el comportamiento de los diferentes materiales ante la energía acústica.

##### **4.4.1. Influencia de la velocidad de aire en el campo acústico**

Durante la caracterización del sistema de aplicación de ultrasonidos de potencia, previa a su montaje en el secadero, se midió la estructura e intensidad del campo acústico generado (Apartado 4.1.1) en condiciones de aire en reposo. Los resultados obtenidos en las experiencias de lecho fluidizado sugieren que los efectos asociados a los ultrasonidos de potencia no aparecen en condiciones de flujo de aire elevado. En vistas a estos resultados se consideró que el campo acústico generado por el sistema de aplicación podría verse afectado por la velocidad del aire. Para analizar dicha influencia se volvió a caracterizar el campo

acústico, pero esta vez variando la velocidad del flujo de aire. Para ello se utilizó el mismo montaje experimental y metodología descritos en el Apartado 3.3.2.3 al que se le acopló un soplante idéntico al existente en el secadero convectivo (Apartado 3.3.1). El control de la velocidad del aire se realizó con un controlador de procesos (E5CK, Omron, Kyoto, Japón). Se realizó un barrido de la presión acústica existente en el interior del cilindro utilizando un micrófono, tal y como se muestra en el Apartado 3.3.2.3. La señal emitida por el micrófono se filtró con un heterodino (Brüel & Kjær, Naerum, Dinamarca). La anchura de banda de la frecuencia filtrada fue de 100 Hz y se centró en torno a la frecuencia media de trabajo del transductor (21.7 kHz). Se realizaron medidas sin flujo de aire y a diferentes velocidades de aire: 0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12 y 14 m/s. Además se realizaron experiencias en las mismas condiciones pero sin filtrar la señal emitida por el micrófono. Las experiencias se realizaron sin un control específico de la temperatura aunque ésta se mantuvo siempre en unas condiciones medias de  $20 \pm 2$  °C.

En la Figura 4.4.1 se muestra la evolución del nivel medio de presión sonora determinado en las diferentes experiencias. En las experiencias donde no se filtró la señal, se aprecia una tendencia creciente del nivel de presión sonora a medida que se incrementa la velocidad de aire.

El flujo de aire provoca ruido de baja frecuencia al incidir sobre la rejilla protectora del micrófono. Este ruido enmascara la señal acústica debida al modo resonante del cilindro. Al filtrar la señal, se elimina esta componente de ruido quedando únicamente la señal debida al modo de trabajo del transductor. Por lo tanto, para medir la presión sonora realmente generada en el interior del cilindro resulta necesario filtrar la señal para eliminar la componente del ruido.

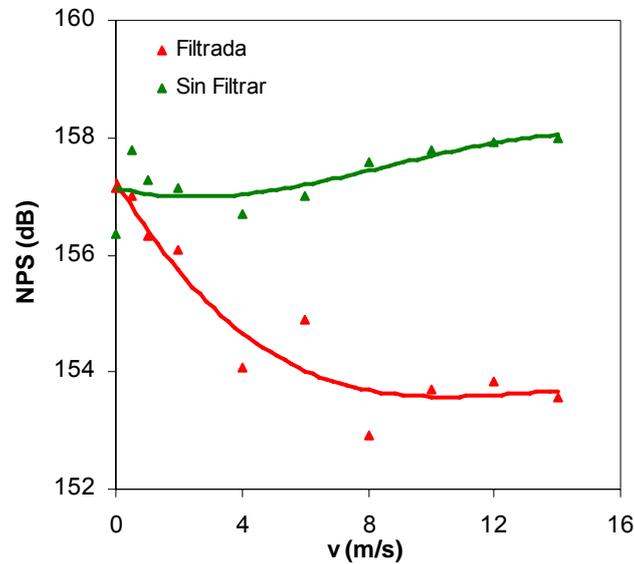
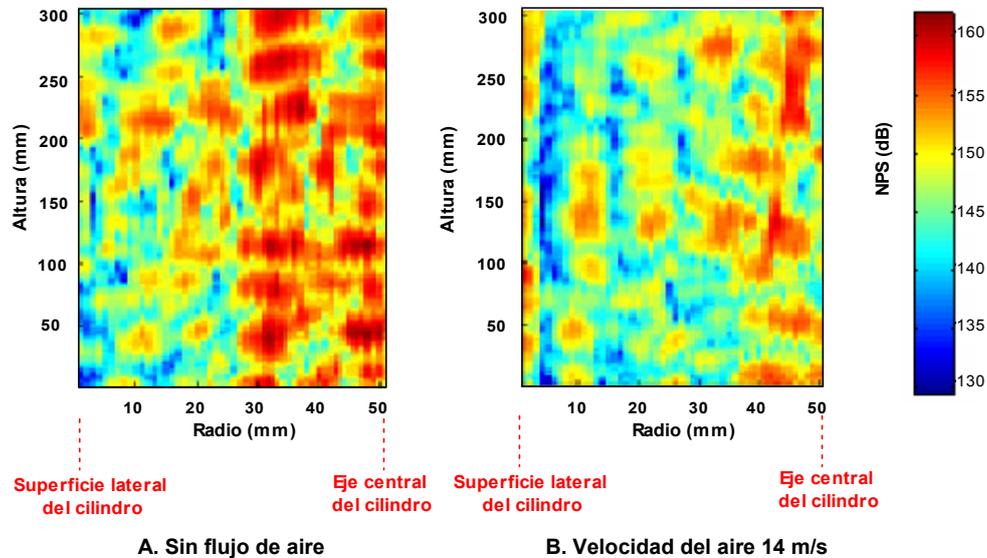


Figura 4.4.1. Evolución del nivel de presión sonora medio medido con la señal del micrófono filtrada (—) o sin filtrar (—).

Así, una vez filtrada la señal emitida por el micrófono, se aprecia un descenso acusado de la presión acústica al aumentar la velocidad de aire. Este descenso es especialmente brusco a partir de 2 m/s. La presión acústica parece estabilizarse a partir de 8 m/s. En la Figura 4.4.2 se muestra la perturbación que provoca el flujo de aire en la estructura del campo acústico. Este efecto podría explicar por qué no se ha encontrado ninguna influencia de los ultrasonidos de potencia en las experiencias en lecho fluidizado. Si a medida que aumenta la velocidad de aire descende el nivel de energía ultrasónica presente en el medio, se pueden presentar niveles de intensidad acústica insuficientes para producir algún tipo de efecto en la velocidad de secado. Por otro lado, el umbral de velocidad de aire a partir del cuál no se manifiestan los efectos de los ultrasonidos podría variar para los diferentes productos, ya que su sensibilidad a la energía acústica puede ser diferente.

Cárcel (2003) encontró un fenómeno similar al estudiar el campo acústico generado por un baño de ultrasonidos (40 kHz). Se observó que la presión acústica en el agua del baño disminuyó cuando ésta estuvo en condiciones de agitación frente a la determinada en condiciones estáticas.



**Figura 4.4.2. Estructura del campo acústico en diferentes condiciones de flujo de aire.**

#### **4.4.2. Secado de diferentes productos, zanahoria, corteza de limón y caqui, a diferentes velocidades del aire**

El estudio de la variación del campo acústico con la velocidad del aire puso de manifiesto la disminución de energía acústica en la cámara de secado provocada por el aumento de la velocidad del aire. Por lo tanto, los productos estarán sometidos a diferentes niveles de intensidad acústica en función de la velocidad de aire que se esté utilizando. Ante estas circunstancias, se planteó realizar experiencias de secado de diferentes productos y geometrías (cubos de zanahoria, cilindros de caqui y discos de corteza de limón) en un amplio rango de velocidades de aire (0.5 y 12 m/s) con (US, 75 W, 21.7 kHz) y sin (SUS) aplicación

de ultrasonidos de potencia. El objetivo perseguido con estas experiencias fue evaluar tanto la influencia de la velocidad del aire en el secado acústico, como el comportamiento de los diferentes productos en distintas condiciones de energía acústica recibida.

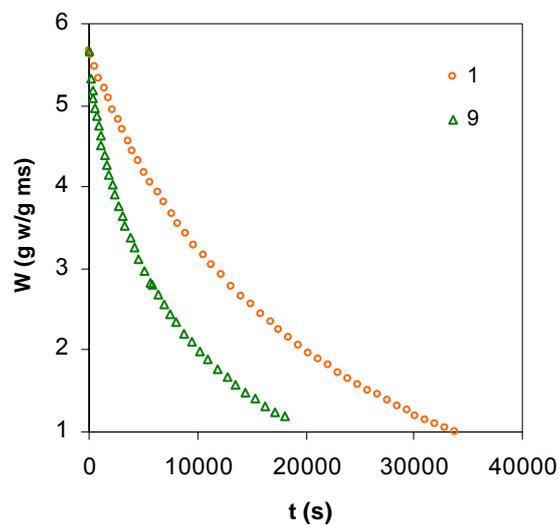
En el Anejo 3 se muestran las cinéticas de secado obtenidas para los distintos productos estudiados: cubos de zanahoria de 17 mm de lado (Figuras A3.1 y A3.2), cubos de zanahoria de 8.5 mm de lado (Figuras A3.3 y A3.4), discos de corteza de limón de 10 mm de espesor (Figuras A3.5 y A3.6) y cilindros de caqui de 30 mm de altura y 13 mm de diámetro (Figuras A3.7 y A3.8).

Todos los productos mostraron únicamente un periodo de velocidad de secado decreciente. Por lo tanto, la humedad inicial coincidió con la humedad crítica al no aparecer el periodo de velocidad de secado constante (Karathanos y Belesiottis, 1997).

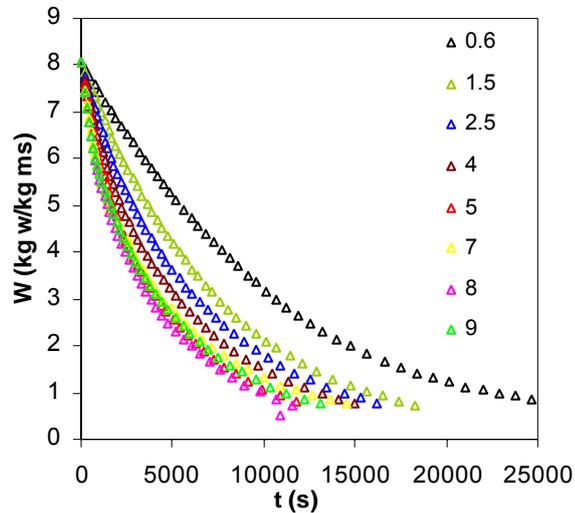
La velocidad del aire afectó a la cinética del proceso en las experiencias SUS. En la Figura 4.4.3 se muestra, a modo de ejemplo, las cinéticas de secado de corteza de limón realizadas a 1 m/s y a 9 m/s. En dicha figura se puede observar que el tiempo necesario para alcanzar una humedad de 1.5 kg w/kg ms fue superior a 25000 s al utilizar una velocidad de aire de 1 m/s, mientras que en el caso de aumentar la velocidad de aire a 9 m/s el tiempo se redujo a 14000 s. En definitiva, en el secado de corteza de limón el incremento de velocidad del aire disminuyó el tiempo necesario para alcanzar un determinado contenido de humedad. Este mismo hecho se repitió en el resto de productos (Anejo 3). Como consecuencia del aumento de la velocidad del aire se reduce el espesor de la capa límite de difusión, lo que supone la reducción de la resistencia externa a la transferencia de materia y, por tanto, el incremento de la velocidad de secado.

Sin embargo, el efecto de la velocidad del aire en las experiencias SUS fue apreciable hasta un determinado umbral de velocidad del aire (Anejo 3). En la Figura 4.4.4 se puede observar cómo, en el caso de las experiencias de secado de cubos de zanahoria de lado 8.5 mm, a partir de 4 m/s, las diferencias entre las

cinéticas de secado son mínimas a distintas velocidades de aire. Estos resultados indican que, por debajo de 4 m/s, la transferencia de materia está controlada tanto por la resistencia interna como por la resistencia externa. Cuando la velocidad de aire supera este umbral, el espesor de la capa límite no se reduce apreciablemente, por lo que la cinética de secado pasa a estar controlada por la resistencia interna a la transferencia de materia. En cuanto al resto de productos utilizados en este grupo de experiencias, se encontraron unos umbrales de velocidad de aire similares a los mostrados para los cubos de zanahoria de 8.5 mm de lado (Anejo 3). La modelización de las cinéticas de secado contribuirá a la determinación más precisa de estos umbrales de velocidad de aire que limitan las zonas del secado controladas por la resistencia interna y externa.

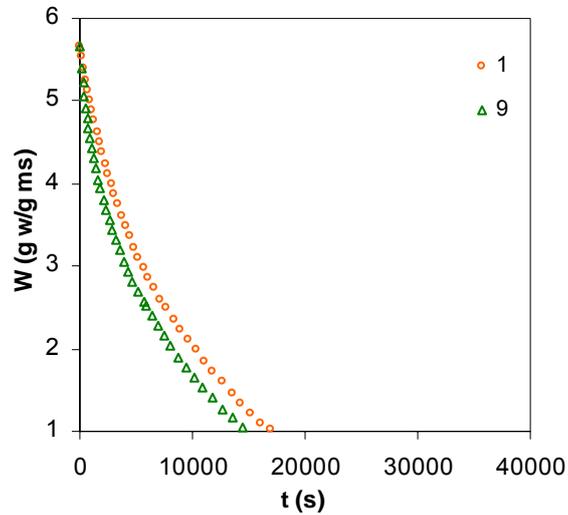


**Figura 4.4.3. Secado de discos de corteza de limón (espesor 10 mm) a diferentes velocidades de aire (m/s). Experiencias SUS a 40 °C.**



**Figura 4.4.4. Secado de cubos de zanahoria (8.5 mm de lado) a diferentes velocidades de aire (m/s). Experiencias SUS a 40 °C.**

En las experiencias US también se encontró una influencia similar de la velocidad del aire en las cinéticas de secado de los distintos productos a la ya mostrada en las experiencias SUS. Sin embargo, en este caso, la aplicación ultrasónica disminuyó las diferencias provocadas por la velocidad del aire entre las cinéticas. Si se comparan las Figuras 4.4.3 y 4.4.5 se puede observar como en el caso de las experiencias US (Figura 4.4.5) las cinéticas de corteza de limón realizadas a 1 y 9 m/s están más próximas entre sí que en el caso de las experiencias SUS (Figura 4.4.3). Este mismo comportamiento puede observarse en las Figuras A3.1, A3.2, A3.3, A3.4, A3.7 y A3.8 para el resto de productos.



**Figura 4.4.5. Secado de discos de corteza de limón (espesor 10 mm) a diferentes velocidades de aire (m/s). Experiencias US (75 W, 21.7 kHz) a 40 °C.**

En la Figura 4.4.6 se comparan experiencias SUS y US de secado de los distintos productos realizadas a bajas y altas velocidades de aire. En todos los casos se puede observar una clara influencia de los ultrasonidos de potencia a bajas velocidades del aire. Así en el caso de los discos de corteza de limón el tiempo necesario para alcanzar un contenido de humedad de 1 kg w/kg ms fue superior a 30000 s en las experiencias SUS y, sin embargo, se situó por debajo de 20000 s cuando se aplicaron ultrasonidos de potencia (experiencias US). Este mismo hecho puede observarse para el resto de productos (Figura 4.4.6).

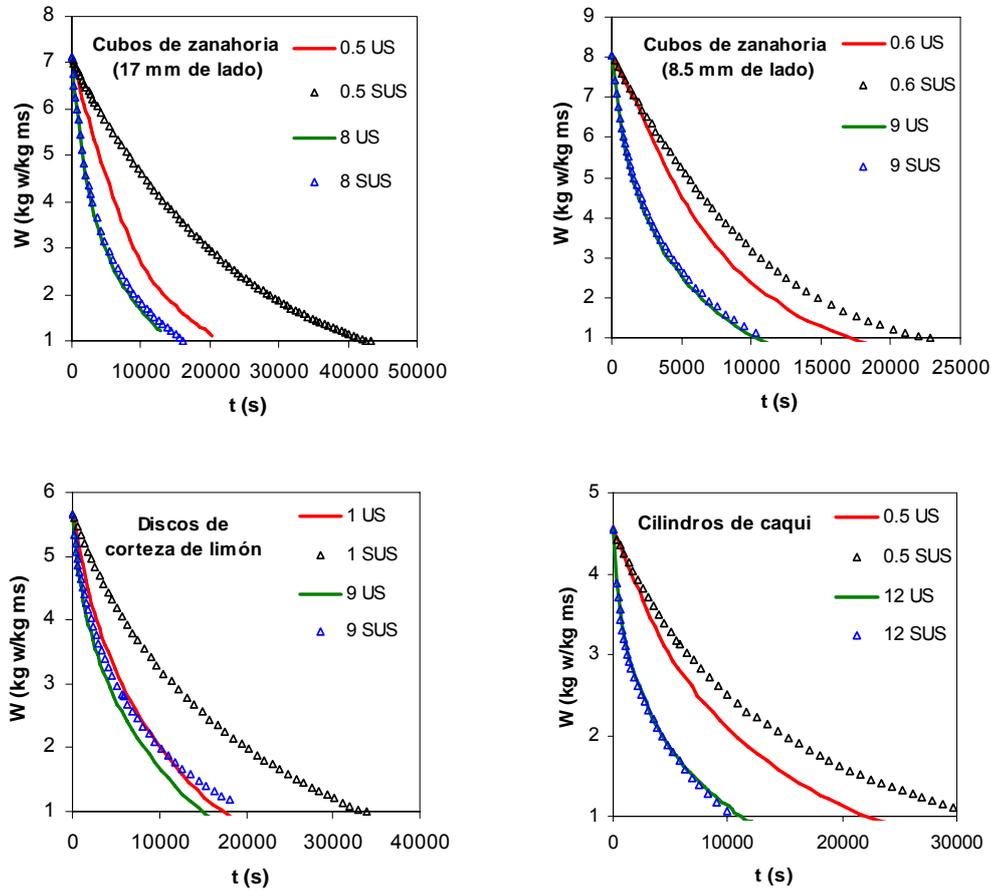


Figura 4.4.6. Comparación de cinéticas SUS y US (75 W, 21.7 kHz) de los diferentes productos.

Por otro lado, la influencia de la aplicación de los ultrasonidos de potencia desapareció en las experiencias de secado de zanahoria y caqui realizadas a altas velocidades de aire (8, 9 y 12 m/s) como se muestra en la Figura 4.4.6. El comportamiento diferente en condiciones de baja o alta velocidad de aire mostrado por estos productos puede explicarse considerando la influencia que tiene el flujo de aire en la intensidad del campo acústico generado. A bajos niveles de velocidad del aire, la intensidad acústica real aplicada es superior que cuando

se utilizan velocidades de aire altas. Este hecho explicaría el comportamiento observado en las cinéticas de secado de la Figura 4.4.6 para la zanahoria y el caqui, así como el que ya se comentó en las experiencias realizadas en lecho fluidizado de zanahoria y albaricoque (Apartado 4.3).

Resultados experimentales similares a los obtenidos en este trabajo han sido mostrados en la bibliografía por otros autores. Gallego-Juárez et al. (1999), utilizando un sistema de aplicación de ultrasonidos sin contacto directo (20 kHz, 155 dB), observaron que la influencia de los ultrasonidos durante el secado de láminas de zanahoria de 2 mm de espesor era menos importante a 3 m/s que a 1.3 y 1.6 m/s. Nakagawa et al. (1996) realizaron experiencias de secado de láminas de surimi (3 mm de espesor) a 40 °C y velocidades comprendidas entre 1.6 y 2.8 m/s sin y con la aplicación de ultrasonidos sin contacto directo (19.5 kHz, 155 dB). La velocidad de secado del surimi aumentó en todo el rango de velocidad de aire evaluado por la aplicación ultrasónica. Las velocidades de aire utilizadas en las experiencias de secado de surimi pueden considerarse bajas teniendo en cuenta los resultados obtenidos en este trabajo, lo que posiblemente facilitó la aparición de los efectos de los ultrasonidos en todo el rango de velocidad de aire.

En las experiencias de secado de corteza de limón realizadas a altas velocidades de aire se observó un comportamiento diferente al mostrado para la zanahoria y el caqui. En el caso de este producto, los ultrasonidos no sólo redujeron el tiempo de secado a bajas velocidades del aire, si no también cuando se utilizaron velocidades de flujo elevadas y, por tanto, las muestras recibieron menores niveles de intensidad acústica (Figura 4.4.6). Este comportamiento sugiere que la corteza de limón sería un producto más sensible a la energía acústica que la zanahoria o el caqui.

La modelización de las cinéticas de secado permitirá cuantificar los efectos asociados a la aplicación ultrasónica. A partir de la modelización se podrá determinar con mayor precisión la influencia de la velocidad del aire sobre el control del secado convectivo por parte de la resistencia externa, el rango de velocidades de aire donde la aplicación de ultrasonidos influye en el secado de los

distintos productos, así como, la influencia de los ultrasonidos de potencia en los parámetros cinéticos.

#### **4.4.3. Modelos SRE. Influencia de la velocidad del aire**

Se utilizaron modelos difusionales para modelizar las cinéticas de secado en lecho fijo de zanahoria, corteza de limón y caqui (Figuras A3.1, A3.2, A3.3, A3.4, A3.5, A3.6, A3.7 y A3.8). Los modelos planteados variaron en función de la geometría de las muestras despreciándose en todos los casos la resistencia externa.

En el caso de los cubos de zanahoria se utilizó un modelo difusional para geometrías cúbicas (Ec. 3.6.10) de 17 mm de lado ( $2L$ ) y 8.5 mm de lado ( $2L$ ) (Tablas A3.1 y A3.2 y Figura 4.4.7). La difusividad efectiva identificada en las experiencias SUS de cubos de zanahoria de 17 mm de lado realizadas a 10 m/s fue del orden de 4 veces mayor que cuando la velocidad del aire fue de 0.5 m/s. En el caso de las experiencias US, la difusividad efectiva identificada a 10 m/s fue únicamente el doble que para las experiencias a 0.5 m/s. Un comportamiento similar se puede observar en las experiencias realizadas con los cubos de zanahoria de 8.5 mm de lado (Tabla A3.2).

Los valores de la difusividad efectiva identificados para la zanahoria en las mismas condiciones experimentales difieren considerablemente para las dos geometrías ensayadas. Estas diferencias observadas podrían explicarse considerando que las muestras utilizadas en cada geometría pertenecían a diferentes lotes de zanahorias. De hecho, las zanahorias cortadas en cubos de 17 mm de lado fueron del mismo lote que las que se utilizaron en las experiencias de lecho fluidizado (Apartado 4.3) cortadas en cubos de 8.5 mm de lado y los valores de difusividad identificados a altas velocidades de aire fueron semejantes a los obtenidos para aquellas experiencias (Tabla 4.3.1).

Por lo tanto cabe pensar que los valores de difusividad efectiva identificados para las dos geometrías de zanahoria ( $2L = 17$  mm y  $2L = 8.5$  mm) no son

comparables entre sí debido a las diferencias en materia prima. Sin embargo, sí se puede comparar la tendencia observada respecto a la influencia de la velocidad del aire. En la Figura 4.4.7 se representa la evolución de los valores de la difusividad efectiva identificados (Tablas A3.1 y A3.2) con la velocidad del aire para ambas geometrías ensayadas.

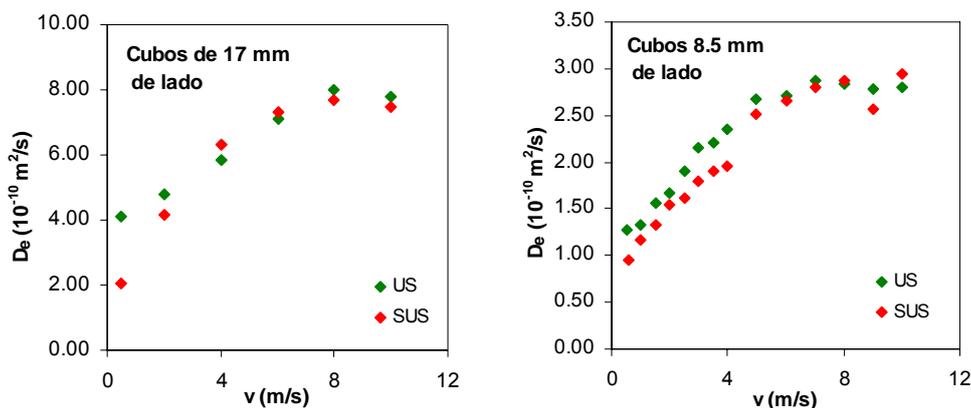


Figura 4.4.7. Influencia de la velocidad del aire en la difusividad efectiva, modelo SRE. Secado de cubos de zanahoria, experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz) a 40 °C.

En la Figura 4.4.7 se puede observar que los valores de difusividad efectiva identificados para las experiencias SUS y US aumentaron con la velocidad del aire. La difusividad efectiva identificada incluye todos los efectos cinéticos del proceso de secado, no sólo los asociados a los mecanismos de difusión, si no también los debidos a mecanismos no conocidos y a desviaciones por simplificaciones realizadas en la modelización (Mulet, 1994). El modelo difusional utilizado (SRE) asume una resistencia externa despreciable. Si esta hipótesis no se cumple, los valores de la difusividad efectiva identificados incluirán el efecto de esta resistencia en la cinética del proceso. Esta es la razón por la que los valores de la difusividad efectiva aumentaron con la velocidad del aire. A medida que aumentó la velocidad del aire, la importancia de la resistencia externa en la transferencia de materia disminuyó y, por tanto, la difusividad efectiva identificada está menos influenciada por esta variable (Figura 4.4.7). El umbral de velocidad

del aire a partir del cuál la difusividad efectiva dejó de ser dependiente de este parámetro se situó en torno a los 5 m/s para ambos tamaños. Mulet et al. (1987) identificaron un umbral de velocidad de aire inferior (2 m/s) para el secado de cubos de zanahoria a 30 °C. Las diferencias podrían explicarse por el hecho de que estos autores realizaron los secados con un lecho de partículas. Esto disminuye la sección de paso del aire y, por tanto, aumentó la velocidad de aire efectiva alrededor de las muestras. En cambio, en las experiencias realizadas en el presente trabajo, la disposición de las muestras en el sistema árbol no produjo una reducción apreciable de la sección de paso del aire, por lo que la velocidad alrededor de las muestras sería similar a la registrada. Umbrales de velocidad del aire ligeramente inferiores (1-2 m/s) también han sido encontrados en la bibliografía para el secado en monocapa de otros productos como brócoli (Mulet et al., 1999d) y rizomas de *Curcuma longa* (Blasco et al., 2006).

En cuanto al efecto de los ultrasonidos de potencia en la cinética de secado, éstos aumentaron los valores de la difusividad efectiva identificados a bajas velocidades de aire respecto a los obtenidos sin aplicación de ultrasonidos. En el caso de los cubos de zanahoria de 17 mm de lado, la influencia de los ultrasonidos sólo es apreciable a velocidades inferiores a 4 m/s. Mientras, en el caso de los cubos de 8.5 mm de lado la influencia también es apreciable a la velocidad de 4 m/s (Tablas A3.1 y A3.2, Figura 4.4.7). En definitiva, la influencia de los ultrasonidos fue únicamente visible en el rango de velocidades de aire donde el secado es controlado por la resistencia externa. A la vista de estos resultados, se puede afirmar que los ultrasonidos de potencia redujeron la resistencia externa a la transferencia de materia durante el secado convectivo de zanahoria.

Diferentes fenómenos asociados a la energía acústica pueden explicar su influencia en la resistencia externa. En primer lugar, las variaciones de presión producidas por los ultrasonidos de potencia en las interfases gas-sólido pueden hacer que, durante las fases de presión negativa, disminuya la temperatura de evaporación y, así, aumente la velocidad de evaporación de agua en las zonas de la superficie del sólido saturadas (Gallego-Juárez, 1998). En segundo lugar, las

ondas ultrasónicas producen velocidades oscilantes y microcorrientes en las interfases gas-sólido que pueden disminuir el espesor de la capa límite de difusión y, por tanto, reducir la resistencia externa a la transferencia de materia (Arkhangel'skii y Statnikov, 1973).

A partir de velocidades de aire superiores a 4 m/s, los ultrasonidos de potencia dejaron de tener una influencia clara sobre los valores de difusividad efectiva identificados en las experiencias de secado de cubos de zanahoria. La influencia de los ultrasonidos en la difusividad efectiva coincide con los mayores niveles de intensidad acústica en el medio (Apartado 4.4.1).

Por tanto, la ausencia de efectos de los ultrasonidos de potencia a altas velocidades de aire podría deberse a dos razones. Por un lado, se puede considerar que los ultrasonidos no producen ningún efecto, o es pequeño, en la resistencia interna a la transferencia de materia durante el secado de cubos de zanahoria, por lo tanto, cuando el proceso de secado está controlado por esta resistencia (velocidad de aire alta) no hay efecto de los ultrasonidos. Por otro lado, también se podría asociar la ausencia de efectos a los bajos niveles de energía acústica en el medio debido a las altas velocidades de aire utilizadas.

Los resultados obtenidos no se han podido comparar con otros resultados bibliográficos, ya que no se han encontrado referencias que analicen en profundidad la influencia de la velocidad del aire en el secado convectivo asistido por ultrasonidos.

La bondad de los ajustes de las cinéticas de secado de cubos de zanahoria conseguida por los modelos SRE se puede estimar a partir de los porcentajes de varianza explicada obtenidos. En las Tablas A3.1 y A3.2 se observa como los porcentajes de varianza explicada aumentaron a medida que se incrementó la velocidad del aire hasta situarse en valores comprendidos entre 96 y 97 % a las velocidades más altas. Esto indica que el modelo se ajusta mejor a los datos experimentales cuando éstos se acercan más a las hipótesis asumidas en el mismo. En los secados realizados a velocidades de aire elevadas se puede asumir

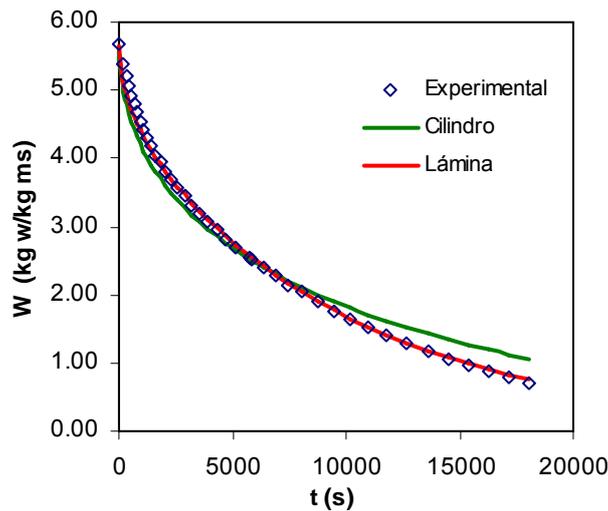
que la resistencia externa es despreciable frente a la resistencia interna lo que se traduce en mejores ajustes de los datos experimentales. Además, se podrían obtener porcentajes de varianza explicada más elevados si se incluyeran en el modelo fenómenos, como el encogimiento (Devahastin et al., 2004; Mayor y Sereno, 2004; Panyawong y Devahastin, 2007), cuya importancia ha sido mostrada en la bibliografía para la descripción del secado de la zanahoria.

En cuanto a los discos de corteza de limón, éstos presentan una geometría que se puede asimilar a la de un cilindro finito de 10 mm de altura y de 18.9 mm de diámetro. Así, en su modelización se utilizó el modelo difusional para un cilindro finito de diámetro (2R) 18.9 mm y espesor (2L) 10 mm (Ec. 3.6.9) (Tabla A3.3). El modelo SRE de cilindro finito no ajustó bien las cinéticas de secado experimentales de los discos de corteza de limón, como muestran los porcentajes de varianza explicada obtenidos, siempre menores del 97 %.

En vista a estos resultados, se tuvieron en cuenta dos hipótesis de partida para abordar una nueva modelización de este producto. Por un lado, que la cera natural del flavedo podía suponer una barrera para la pérdida de agua, impermeabilizando al producto (Garau et al., 2006). Por otro lado, también se tuvo en cuenta que la disposición de los grandes espacios intercelulares presentes en el albedo se da principalmente en sentido radial respecto del fruto (Scott y Baker, 1947; Spiegel-Roy y Goldschmidt, 1996; Cháfer, 2000; Agustí, 2003). Según estas suposiciones, el movimiento del agua durante el secado de la corteza de limón transcurriría perfectamente en dirección radial a través de sus grandes espacios intercelulares hasta la superficie del albedo. Por lo tanto, los discos de corteza de limón se comportarían como láminas infinitas con su longitud característica igual al espesor de los discos ( $L = 10$  mm) (Tabla A3.4).

Así, el modelo SRE de lámina infinita mejoró el ajuste de las cinéticas de secado respecto a los resultados obtenidos con el modelo de cilindro finito (Tabla A3.3 y A3.4), como muestran los porcentajes de varianza explicados en algunos casos superiores al 99 %. En las Figura 4.4.8 y A3.9 se observa como los valores de humedad media calculados con el modelo de lámina infinita se aproximan más

a los valores experimentales que los obtenidos con el modelo de cilindro finito. Por lo tanto, la suposición realizada de tener en cuenta una geometría de lámina infinita para modelizar el secado de la corteza de limón se consideró adecuada.



**Figura 4.4.8. Modelización del secado de corteza de limón, modelos SRE para lámina infinita y cilindro finito. Experiencia US (75 W, 21.7 kHz), 7 m/s y 40 °C.**

Los valores de difusividad efectiva identificados con el modelo SRE (Tabla A3.4; Figura 4.4.9) para el secado de corteza de limón son ligeramente más elevados que los obtenidos por Garau et al. (2006) en las cinéticas de secado de corteza de naranja, que variaron entre  $0.81 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  y  $5.11 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  para experiencias realizadas a 2.5 m/s y temperaturas comprendidas entre 30 y 90 °C.

Al igual que ocurrió en las experiencias SUS de cubos de zanahoria, los valores identificados de difusividad efectiva de corteza de limón aumentaron con la velocidad de aire. Así, el valor identificado a 0.5 m/s representó aproximadamente la mitad del valor identificado a 9 m/s. El umbral de velocidad del aire que limita la zona del secado controlada por la resistencia externa se situó en torno a los 5 m/s para estas experiencias (Figura 4.4.9). A partir de este umbral la transferencia de materia pasa a estar controlada por el movimiento del agua en el interior del sólido, es decir la resistencia interna.

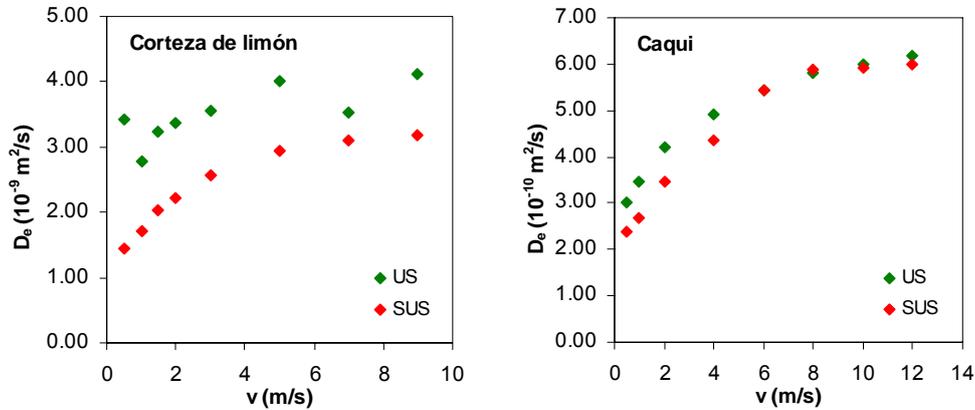


Figura 4.4.9. Influencia de la velocidad del aire en la difusividad efectiva (modelo SRE). Secado de discos de corteza de limón y cilindros de caqui, experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz).

En las experiencias US la influencia de la velocidad del aire en la difusividad efectiva no fue tan clara como muestra la escasa diferencia entre los valores identificados a 0.5 y 10 m/s (Tabla A3.4). Los valores de difusividad efectiva identificados a bajas y altas velocidades de aire presentaron escasas diferencias, observándose una ligera tendencia al aumento de los valores con la velocidad (Figura 4.4.9).

En cuanto al efecto de los ultrasonidos de potencia en los valores de difusividad efectiva identificados, la influencia fue evidente en todo el rango de velocidades de aire estudiado (Tabla A3.4; Figura 4.4.9), al contrario que en el caso de los cubos de zanahoria, donde el efecto de los ultrasonidos solamente se encontró a bajas velocidades de aire (Figura 4.4.7). A pesar de la disminución de la intensidad del campo acústico por el aumento de la velocidad del aire, los niveles de energía fueron suficientes para afectar al secado de corteza de limón.

Posiblemente, la estructura de la corteza de limón condicione su mayor sensibilidad a la energía acústica. Los valores de difusividad efectiva identificados a altas velocidades de aire en las experiencias de secado de zanahoria son de un orden de magnitud inferior que en el caso de la corteza de limón ( $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  frente

a  $10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s), lo que indica una mayor resistencia interna al movimiento del agua. Esto, podría explicar por qué a elevadas velocidades de aire, y, por tanto, bajos niveles de energía acústica, la difusividad efectiva identificada en las experiencias de secado de zanahoria no se vio afectada por la aplicación de ultrasonidos de potencia y la de corteza de limón sí.

Una de las propiedades estructurales que puede tener mayor importancia en la aplicación ultrasónica es la porosidad. Los productos de mayor porosidad pueden ser más sensibles a los ciclos de compresión y descompresión producidos por las ondas ultrasónicas facilitando el movimiento del agua por sus grandes espacios intercelulares (Lewicki, 2004). Así, los efectos estructurales de los ultrasonidos, como el efecto esponja (Gallego-Juárez, 1998), serían más intensos y favorecerían la eliminación del agua. En productos de baja porosidad, los espacios intercelulares son de menor tamaño y presentan una mayor resistencia al movimiento del agua necesitando mayores niveles de energía acústica para afectar a dicha resistencia. En este sentido, esta hipótesis se avala por el hecho de que la corteza de limón presenta una porosidad (0.40) diez veces mayor respecto a la zanahoria (0.04) (Cháfer et al., 2003; Boukouvalas et al., 2006). Esta hipótesis también concuerda con el hecho de que en las experiencias realizadas en lecho fluidizado (Apartado 4.3) de zanahoria y albaricoque (porosidad 0.022) (Boukouvalas et al., 2006) no se observará ningún efecto asociado a la aplicación ultrasónica ya que ambos productos presentan una baja porosidad.

La influencia de la porosidad también puede explicarse porque en los productos más porosos, la absorción de energía acústica por el material podría ser mayor. De esta manera, aumentaría la energía disponible en el interior del material produciendo compresiones y descompresiones más intensas. De igual manera, los efectos de los ultrasonidos en las interfases gas-sólido de los materiales porosos serían más intensos al presentar una mayor red interna de espacios intercelulares, lo que reduciría también la resistencia interna a la transferencia de materia.

Resultados similares fueron mostrados por Mulet et al. (2003b) al aplicar ultrasonidos de potencia en procesos de transferencia de materia en medio líquido

---

con carne y manzana. Estos autores determinaron que los efectos de los ultrasonidos sobre la transferencia de materia en tratamientos sólido-líquido fueron mucho más intensos con la manzana que con la carne. De nuevo, este comportamiento puede explicarse a partir de la diferencia de porosidad de ambos productos, para la manzana 0.21 y para la carne 0.023 (Boukouvalas et al., 2006). El efecto de la materia prima en los efectos asociados a la aplicación ultrasónica también ha sido mostrado en la bibliografía para otros procesos (Toma et al., 2001; Romdhane y Gourdon, 2002).

Las experiencias de secado realizadas con zanahoria y corteza de limón han puesto de manifiesto una clara influencia tanto de la velocidad del aire como de la materia prima en el secado asistido por ultrasonidos de potencia. Las experiencias de secado de cilindros de caqui se plantearon para verificar los resultados obtenidos con estos productos. Además, el importante número de repeticiones realizadas en el caso del caqui, permitirán extraer conclusiones acerca de la significación de la influencia de los ultrasonidos de potencia durante el secado convectivo.

Las cinéticas de secado de cilindros de caqui se modelizaron con el modelo difusional SRE considerando una geometría de cilindro finito de 30 mm de altura (2L) y 6.5 mm de radio (R) (Tabla 4.4.1). Los valores de difusividad efectiva identificados fueron similares a otros mostrados en la bibliografía. En este sentido, Telis-Romero et al. (2001) encontraron valores de difusividad efectiva comprendidos entre  $2.6 \times 10^{-10}$  y  $5.4 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s en el secado de caquis enteros (var. Rama Forte) a 0.8 m/s y temperaturas entre 50 y 80 °C. Los valores de difusividad efectiva para el caqui son del mismo orden de los obtenidos para la zanahoria o el albaricoque ( $10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s) lo que indica que es un producto que presenta una resistencia interna a la transferencia de materia elevada, al menos superior a la encontrada en la corteza de limón.

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

v (m/s)	US		SUS	
	D <sub>e</sub> (10 <sup>-10</sup> m <sup>2</sup> /s)	VAR (%)	D <sub>e</sub> (10 <sup>-10</sup> m <sup>2</sup> /s)	VAR (%)
0.5	3.02 ± 0.39 <sub>ab</sub>	92.8	2.39 ± 0.53 <sub>a</sub>	94.4
1	3.45 ± 0.21 <sub>ab</sub>	91.1	2.67 ± 0.39 <sub>a</sub>	94.7
2	4.20 ± 0.49 <sub>bc</sub>	95.9	3.45 ± 0.24 <sub>ab</sub>	96.0
4	4.91 ± 0.75 <sub>cd</sub>	98.6	4.35 ± 0.96 <sub>bc</sub>	98.8
6	5.42 ± 0.80 <sub>d</sub>	99.1	5.44 ± 0.51 <sub>cd</sub>	99.2
8	5.79 ± 0.58 <sub>d</sub>	99.3	5.89 ± 0.79 <sub>d</sub>	99.6
10	6.01 ± 0.46 <sub>d</sub>	99.7	5.91 ± 0.51 <sub>d</sub>	99.9
12	6.18 ± 0.30 <sub>d</sub>	99.7	5.99 ± 0.36 <sub>d</sub>	99.9

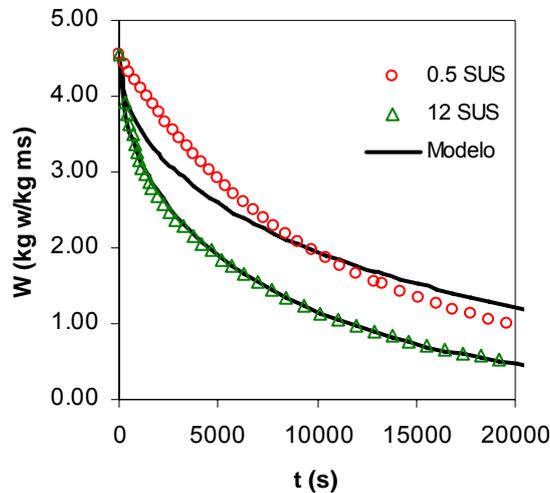
**Tabla 4.4.1. Modelización de las cinéticas de secado de cilindros de caqui (2L = 30 mm, R = 6.5 mm), modelo SRE. Experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz) a 50 °C.** Los subíndices a, b, c y d muestran grupos homogéneos establecidos a partir de los intervalos LSD (p<0.05).

Se realizó un ANOVA multifactorial para evaluar si los valores identificados de la difusividad efectiva resultaron significativamente diferentes (p<0.05) entre sí. Los factores considerados en este análisis fueron la velocidad del aire de secado (8 niveles: 0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 10 y 12 m/s) y la aplicación de ultrasonidos de potencia (2 niveles: con o sin la aplicación de ultrasonidos). La determinación de qué niveles resultaron significativamente diferentes de los demás se realizó a partir del cálculo de los intervalos LSD (p<0.05).

Por un lado, los valores de difusividad efectiva identificados aumentaron de forma significativa (p<0.05) con la velocidad del aire cuando ésta estuvo por debajo de 6 m/s. A partir de este valor de velocidad del aire no se encontró un efecto significativo de la velocidad del aire en la difusividad efectiva. Por lo tanto, la velocidad de aire de 6 m/s podría considerarse como un límite en el control de la resistencia interna y la resistencia externa en las experiencias de secado. En este sentido, se podrían agrupar las cinéticas de secado en dos conjuntos. El primero de ellos incluiría las experiencias realizadas a bajas velocidades de aire (0.5, 1, 2 y 4 m/s) y estaría caracterizado porque la resistencia externa a la transferencia de

materia no es despreciable frente a la interna. El segundo grupo lo constituirían las experiencias realizadas fundamentalmente a altas velocidades de aire (6, 8, 10 y 12 m/s) en las que el control de la cinética de secado es realizado por la resistencia interna. En el caso del caqui, el efecto de la velocidad del aire en la difusividad efectiva (Figura 4.4.9) es similar al ya mostrado en este trabajo para el caso de la zanahoria y la corteza de limón, así como el mostrado en la bibliografía para diferentes productos (Mulet et al., 1999d; Blasco et al., 2006).

Por otro lado, los ultrasonidos de potencia aumentaron de forma significativa ( $p < 0.05$ ) los valores de difusividad efectiva identificados a velocidades de aire inferiores a 6 m/s. Por encima de este umbral, no se pudo observar ningún efecto de los ultrasonidos en la cinética de secado. Estos resultados coinciden con los obtenidos para productos como la zanahoria y el albaricoque en condiciones de velocidad de aire alta. En la bibliografía no se ha encontrado ninguna referencia acerca de la porosidad del caqui, pero, al tratarse de una fruta con un elevado contenido de azúcares solubles, se puede considerar que su porosidad es similar a la de productos como el mango (0.059), el melocotón (0.046) o el propio albaricoque (0.022) (Boukouvalas et al., 2006). En vistas a estos valores, se puede considerar al caqui un producto de baja porosidad, y por tanto elevada resistencia interna. Esta propiedad explicaría la ausencia de efectos asociados a la aplicación de ultrasonidos en condiciones de velocidad de aire alta, y, por tanto, de baja intensidad acústica.



**Figura 4.4.10. Modelización de las cinéticas de secado de caqui con el modelo SRE. Experiencias SUS realizadas a 0.5 y 12 m/s y 50 °C.**

Otro de los parámetros que también cambia con la velocidad del aire es el porcentaje de varianza explicada (Tabla 4.4.1). A medida que se incrementó la velocidad del aire su valor aumentó desde apenas el 93 % a 0.5 m/s, hasta situarse en valores superiores al 99 % cuando la velocidad fue superior a 4 m/s. Este comportamiento, ya mostrado con el resto de productos, puede ser explicado por el hecho de que el modelo considera despreciable la resistencia externa, y por lo tanto, los ajustes a los datos experimentales fueron mejores cuando las condiciones de secado fueron más cercanas a esta condición de contorno asumida en el modelo. En la Figura 4.4.10 se puede observar cómo la tendencia entre los valores calculados y los experimentales fue bastante similar a altas velocidades de aire y muy diferente a bajas.

Los resultados obtenidos, tanto en el caso del caqui como en el resto de productos, sugieren que el modelo difusional sin considerar la resistencia externa (SRE) fue adecuado en aquellas condiciones durante el secado en las que esta resistencia es despreciable frente a la interna. Sin embargo, los resultados también han puesto de manifiesto la necesidad de plantear modelos difusionales

que consideren la resistencia externa (Modelos RE) en aquellos casos donde esta resistencia sea significativa para poder obtener una adecuada modelización de las cinéticas de secado.

Las diferencias entre los valores de difusividad efectiva identificados con el modelo SRE a altas velocidades de aire para las experiencias SUS y US no fueron significativas en el caso de los productos de baja porosidad. Por lo tanto, la influencia de los ultrasonidos sobre la resistencia interna en esos productos no se pudo evaluar con el modelo SRE puesto que la ausencia de efectos de la aplicación ultrasónica a altas velocidades de aire puede asociarse también a la disminución de intensidad acústica provocada por el efecto del flujo de aire. En consecuencia, parece necesario plantear modelos difusionales que permitan determinar la influencia de los ultrasonidos de potencia en la resistencia interna a la transferencia de materia en productos cuya estructura conlleva una elevada resistencia al movimiento del agua en el interior de la partícula.

El planteamiento de un modelo difusional considerando la resistencia externa (RE) a la transferencia de materia permitirá abordar aspectos diferentes a los que permite el modelo SRE. Por un lado, se mejorará la modelización de las cinéticas de secado en las condiciones en que dicha resistencia no sea despreciable. Por otro lado, se evaluará por separado el efecto de los ultrasonidos de potencia en la resistencia externa e interna a la transferencia de materia. En el siguiente apartado se considerará un modelo difusional RE en la modelización de las cinéticas de secado de caqui. Los valores de difusividad efectiva identificados previamente con el modelo SRE se utilizarán como valores iniciales en la identificación de los parámetros del modelo RE ( $D_e$ ,  $k$ ). Esta forma de proceder dota de una mayor fiabilidad a los parámetros identificados con el modelo RE y justifica un uso previo del modelo SRE.

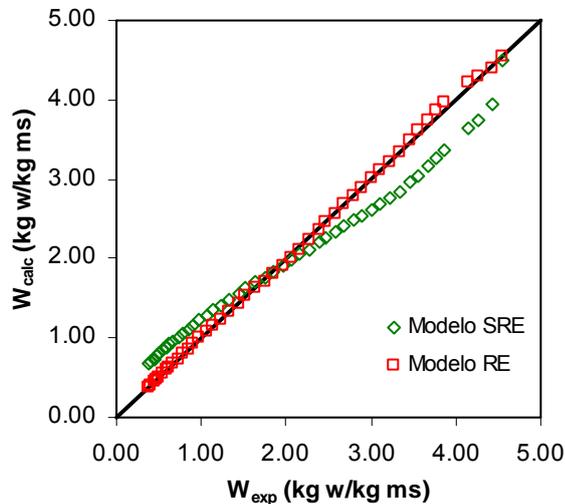
**4.4.4. Modelo RE. Influencia de la velocidad del aire**

Un modelo difusional (RE) aplicado a un geometría de cilindro finito y considerando la resistencia externa a la transferencia de materia fue formulado y resuelto a partir del método de diferencias finitas (Anejo 8). Este modelo se utilizó para la descripción de las cinéticas de secado de caqui obtenidas a velocidades de aire por debajo de 6 m/s, condiciones en las que la resistencia externa es significativa en el control del proceso de secado. En la Tabla 4.4.2 se muestran los parámetros identificados del modelo, así como los diferentes parámetros estadísticos de los ajustes.

v (m/s)	SUS				US			
	D <sub>e</sub> (10 <sup>-10</sup> m <sup>2</sup> /s)	k (10 <sup>-3</sup> kg w/m <sup>2</sup> /s)	VAR (%)	EMR (%)	D <sub>e</sub> (10 <sup>-10</sup> m <sup>2</sup> /s)	k (10 <sup>-3</sup> kg w/m <sup>2</sup> /s)	VAR (%)	EMR (%)
0.5	5.25±0.35 <sub>a</sub>	0.54±0.08 <sub>w</sub>	99.6	7.5	6.75±0.35 <sub>b</sub>	0.61±0.04 <sub>w</sub>	99.8	2.9
1	5.70±0.42 <sub>ab</sub>	0.58±0.02 <sub>w</sub>	99.5	5.0	6.93±1.05 <sub>b</sub>	0.78±0.06 <sub>wx</sub>	99.9	1.3
2	5.49±0.54 <sub>a</sub>	0.96±0.06 <sub>x</sub>	99.9	1.5	6.67±1.56 <sub>b</sub>	1.09±0.04 <sub>y</sub>	99.9	1.7
4	6.02±0.48 <sub>ab</sub>	1.45±0.08 <sub>z</sub>	99.9	1.2	6.09±1.08 <sub>b</sub>	1.59±0.21 <sub>z</sub>	99.8	4.2

**Tabla 4.4.2. Modelización de las cinéticas de secado de cilindros de caqui, modelo RE. Experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz) a 50 °C.** Los subíndices (a, b) y (w, x, y, z) muestran grupos homogéneos establecidos a partir de los intervalos LSD (p<0.05).

La introducción de la resistencia externa en el modelo difusional aumentó la bondad de las predicciones tanto en las experiencias SUS como en las US. Los porcentajes de varianza explicada fueron superiores en todos los casos al 99.5 %. Al mismo tiempo, el error medio relativo (EMR) permaneció siempre por debajo del 8 %. Estos resultados indican un buen ajuste con los datos experimentales. Con el fin de ilustrar estos resultados en las Figuras 4.4.11 y A3.10 se comparan los ajustes obtenidos con el modelo difusional sin considerar la resistencia externa a la transferencia de materia (SRE) o considerándola (RE) en experiencias realizadas a bajas velocidades de aire.



**Figura 4.4.11. Valores experimentales y calculados con los modelos SRE y RE, secado de cilindros de caqui. Experiencia US (75 W, 21.7 kHz) a 0.5 m/s y 40 °C.**

El coeficiente de transferencia de materia identificado ( $k$ ) se vio claramente influenciado por la velocidad del aire. A medida que aumentó la velocidad del aire el valor de este parámetro se incrementó. Este hecho muestra el descenso de la resistencia externa a la transferencia de materia con el aumento de la velocidad del aire debido a la disminución del espesor de la capa límite de difusión.

Se realizó un ANOVA multifactorial para la evaluar si los valores identificados del coeficiente de transferencia de materia resultaron significativamente diferentes ( $p < 0.05$ ) entre sí. Los factores considerados en este análisis fueron la velocidad del aire de secado (4 niveles: 0.5, 1, 2 y 4 m/s) y la aplicación de ultrasonidos de potencia (2 niveles: con o sin la aplicación de ultrasonidos). A partir de este análisis, se observó que la aplicación de ultrasonidos afectó de forma significativa ( $p < 0.05$ ) a los valores del coeficiente de transferencia de materia en este rango de velocidades de aire.

Un ANOVA similar se llevó a cabo para evaluar la influencia de la velocidad del aire y la aplicación ultrasónica en los valores de la difusividad efectiva identificados ( $D_e$ ). Por un lado, la velocidad del aire no influyó significativamente

( $p < 0.05$ ) en los valores de la difusividad efectiva identificados. Esto concuerda con la hipótesis del modelo RE, en el que el efecto de la velocidad del aire y su influencia en la resistencia externa son evaluados a través del parámetro  $k$ , a diferencia del modelo SRE donde el efecto está incluido en la difusividad efectiva. Los valores de difusividad efectiva identificados con el modelo RE en las experiencias SUS realizadas a velocidades inferiores a 6 m/s no resultaron significativamente diferentes a los obtenidos con el modelo SRE a altas velocidades de aire (Figura 4.4.12). Esto mostraría que el modelo describe bien la resistencia interna.

Por otro lado, los ultrasonidos de potencia aumentaron de forma significativa ( $p < 0.05$ ) la difusividad efectiva identificada en las experiencias realizadas a velocidades inferiores a 6 m/s (Tabla 4.4.2). Los valores son también significativamente más altos que los identificados con el modelo SRE en las experiencias de velocidad de aire elevada (Figura 4.4.12) lo que indicaría un efecto de los ultrasonidos sobre la difusividad efectiva.

Por todo ello, cabría concluir que los ultrasonidos de potencia afectaron a las cinéticas de secado de caqui realizadas a bajas velocidades de aire. A partir de los parámetros identificados del modelo RE ( $k$  y  $D_e$ ) se mostró que la influencia de los ultrasonidos fue significativa tanto en relación a la resistencia externa como a la interna en condiciones de velocidad de aire baja (altos niveles de intensidad acústica). La disminución de la intensidad del campo acústico a altas velocidades de aire, provocada por el efecto perturbador del flujo de aire, podría ser la causa de que la difusividad efectiva identificada en estas experiencias no se viera afectada por la aplicación ultrasónica.

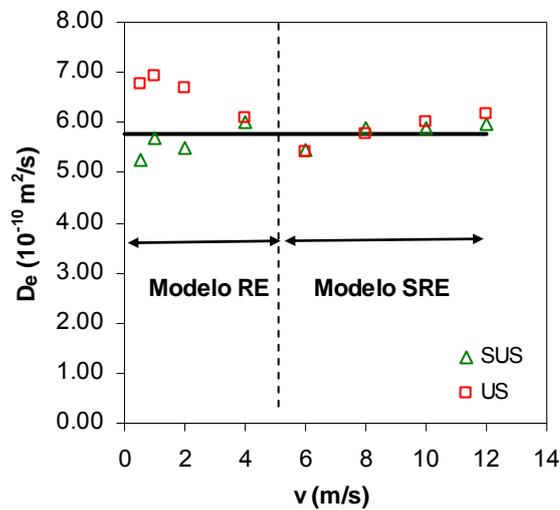


Figura 4.4.12. Difusividad efectiva en experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz) de secado de caqui a 50 °C.

En el modelo RE se identificaron de forma simultánea los valores del coeficiente de transferencia de materia ( $k$ ) y la difusividad efectiva ( $D_e$ ). El problema de optimización planteado identifica los valores de  $k$  y  $D_e$  que minimizan la suma de las diferencias cuadráticas entre los valores de humedad experimental y calculada. En este procedimiento de cálculo cabe pensar que se puedan dar multitud de combinaciones entre estos dos parámetros que alcancen el objetivo perseguido, es decir, encontrar un mínimo de la función suma de las diferencias cuadráticas. Por lo tanto, es necesario determinar la fiabilidad de estos resultados de cara a confirmar que no son meros artificios matemáticos (Cai y Avramidis, 1997).

Los valores de  $D_e$  identificados son similares a los ya anteriormente obtenidos con el modelo SRE, por lo que se puede afirmar que son resultados fiables. Por otro lado, los valores de  $k$  identificados son similares a los mostrados en la bibliografía para otros productos (Krokida et al., 2002; Mulet et al., 2005; Bialobrezewski, 2007). Además, los valores de  $k$  se compararon con los estimados a partir de la correlación empírica propuesta por Roshenow y Choi (1961)

(Apartado 3.6.4). En la Figura 4.4.13 se muestran los valores obtenidos a partir de la correlación empírica, así como los identificados con el modelo RE para las experiencias SUS y US. Según la expresión mostrada en la Ec. 3.6.17 la relación entre los logaritmos neperianos de  $k$  y de la velocidad del aire debería ser lineal, como ocurre en este caso.

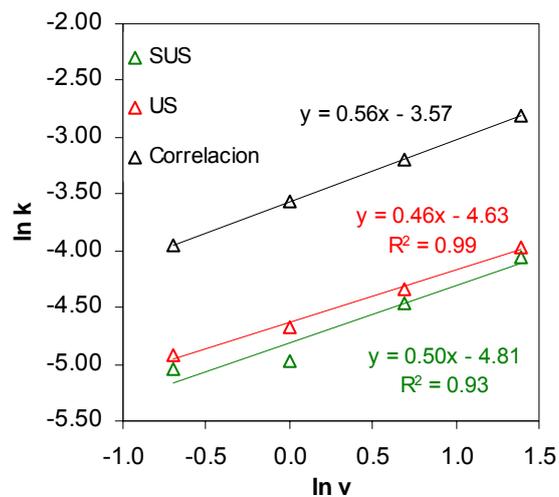


Figura 4.4.13. Coeficiente de transferencia de materia ( $k$ , m/s) en experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz) de secado de caqui a 50 °C.

Los valores de  $k$  identificados muestran una misma tendencia con la velocidad del aire que los valores obtenidos a partir de la correlación empírica, como se puede observar a partir de las pendientes de las relaciones lineales mostradas en la Figura 4.4.13. Este hecho muestra la fiabilidad de los valores identificados con el modelo RE. La diferencia en la ordenada en el origen de los valores identificados con este modelo y los estimados con la correlación puede ser debida a las diferencias entre las condiciones experimentales usadas por Roshenow y Choi (1961) para estimar el factor  $j_D$  y las usadas en este trabajo.

#### **4.4.5. Modelo de Weibull. Influencia de la velocidad del aire**

El modelo empírico de Weibull se utilizó para modelizar las cinéticas de secado de los distintos materiales realizadas en diferentes condiciones de velocidad de aire (Tablas A3.5, A3.6, A3.7 y A3.8). La utilización de otro modelo permite eliminar la posibilidad de la existencia de artificios matemáticos que incidan en la interpretación de los resultados. Además los resultados obtenidos con este modelo complementan los ya mostrados con los modelos difusionales. También, permite comparar la capacidad de ajuste de los modelos teóricos con la de un modelo empírico de amplia utilización (Blasco et al., 2006).

En todos los productos ensayados se encontró una clara influencia de la velocidad del aire en los parámetros del modelo de Weibull (Figuras 4.4.14 y 4.4.15). Por un lado, el parámetro cinético ( $\beta$ ) disminuyó a medida que aumentó la velocidad del aire, dada su relación inversa con la velocidad de secado. Aunque, como se puede observar en la Figura 4.4.14, para velocidades de aire superiores a 5 m/s la variación de este parámetro con la velocidad del aire es prácticamente despreciable. Por lo tanto, la velocidad de aire de 5 m/s delimitaría, de acuerdo con este modelo, la zona del secado controlada por la resistencia externa. A partir de este valor, la velocidad de secado está controlada por la resistencia interna a la transferencia de materia. Como se ha mostrado anteriormente, con los modelos difusionales también se identificó un límite de velocidad similar. Blasco et al. (2006) también utilizaron el parámetro  $\beta$  para distinguir las zonas del secado de rizomas de *Curcuma longa* controladas por la resistencia externa e interna. Por tanto, en vistas a posteriores aplicaciones industriales no sería conveniente superar este umbral de velocidad de aire durante el secado ya que los mayores gastos energéticos, y por tanto medioambientales, no conducirían a un secado más rápido del producto.

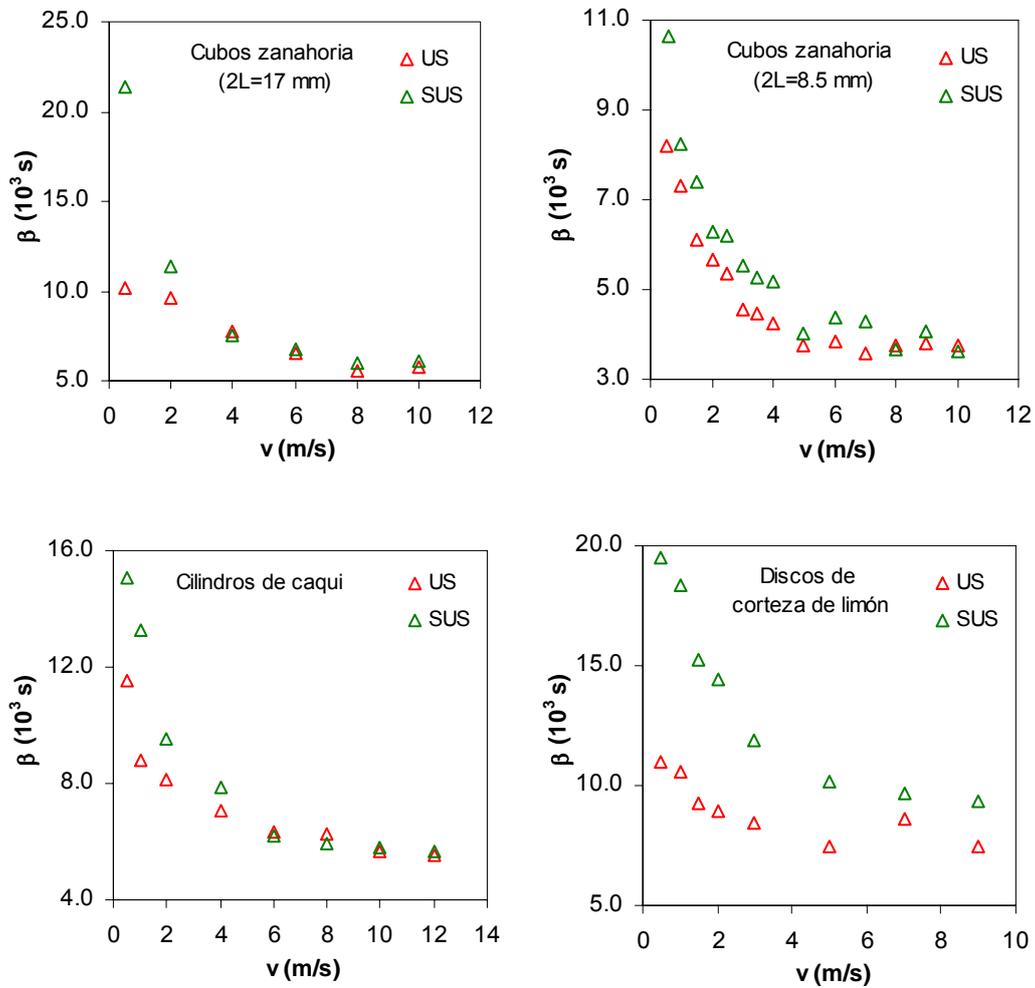


Figura 4.4.14. Evolución del parámetro cinético del modelo de Weibull ( $\beta$ ) con la velocidad del aire, experiencias de secado de diferentes productos.

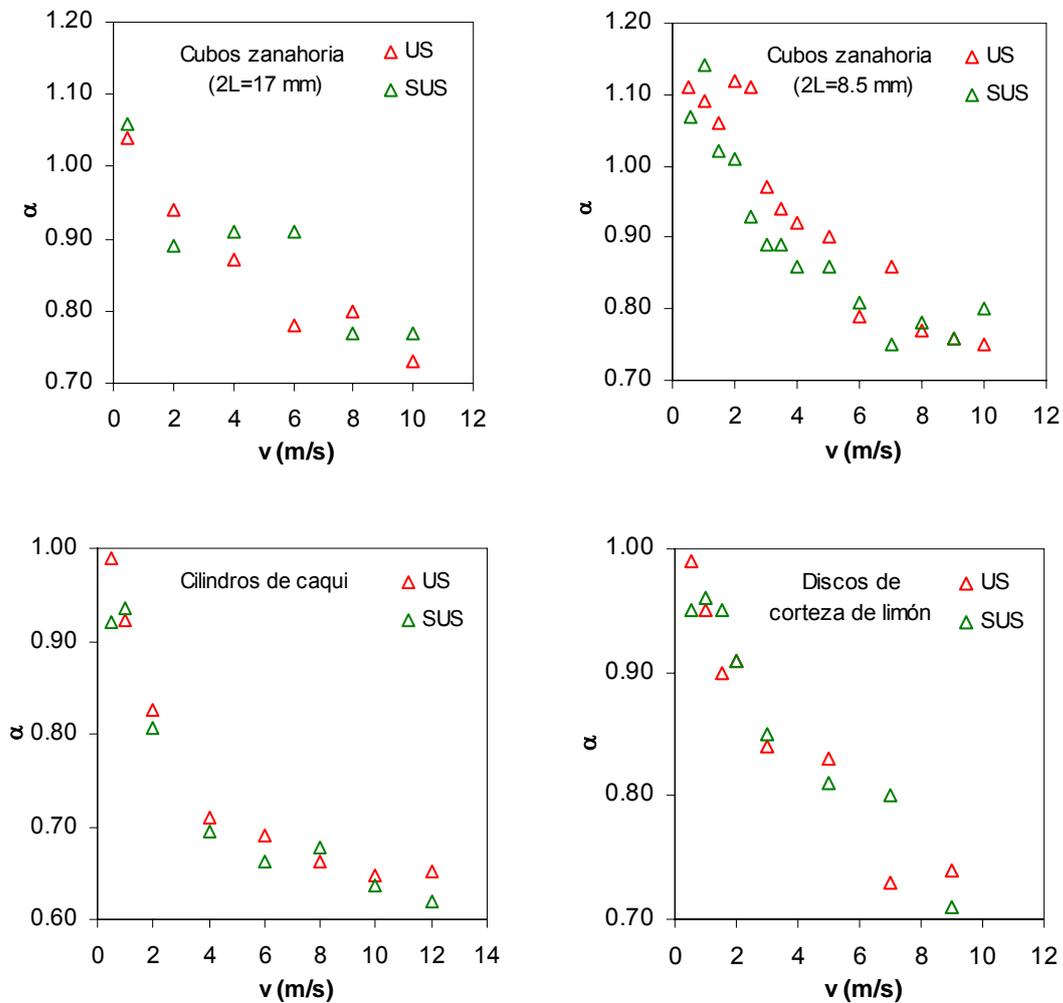


Figura 4.4.15. Evolución del parámetro de forma del modelo de Weibull ( $\alpha$ ) con la velocidad del aire, experiencias de secado de diferentes productos.

Por otro lado, el parámetro de forma del modelo de Weibull ( $\alpha$ ) también disminuyó a medida que la velocidad del aire aumentó. (Figura 4.4.15). El parámetro  $\alpha$  determina un índice de comportamiento del producto durante el secado. Si el parámetro  $\alpha$  es igual a la unidad, la cinética del proceso puede asimilarse a una cinética de primer orden. Si  $\alpha$  es superior a 1, indica la aparición de tiempos muertos en el inicio del proceso (Cunha et al., 1998 y 2001). Los valores del parámetro  $\alpha$  identificados disminuyeron a medida que aumentó la velocidad de secado desde valores cercanos a 1, o ligeramente superiores (1.2), hasta valores próximos a 0.6-0.7 (Tablas A3.5, A3.6, A3.7 y A3.8; Figura 4.4.15). Es decir, el comportamiento del sistema cambió con la velocidad del aire de secado. A bajos valores la resistencia externa controló el proceso y a medida que aumentó la velocidad del aire la transferencia de materia pasó a estar controlada por la resistencia interna.

En cuanto al efecto de los ultrasonidos de potencia, su aplicación resultó en una disminución de los valores del parámetro  $\beta$  (Figura 4.4.14), lo que puede considerarse como un aumento de la velocidad de secado del producto. La influencia de los ultrasonidos en  $\beta$  se encontró únicamente a velocidades de aire inferiores a 5 m/s en el caso de las experiencias realizadas con cubos de zanahoria y cilindros de caqui. A partir de este umbral, y en el caso de estos productos, no se apreció una tendencia clara en el parámetro  $\beta$  debido a la aplicación de ultrasonidos. Como ya ha sido sugerido en los anteriores apartados, el efecto perturbador que la velocidad del aire tiene sobre el campo acústico puede explicar la ausencia de efectos de los ultrasonidos a velocidades de aire altas en estos productos. En el caso de la corteza de limón, los ultrasonidos influyeron sobre el parámetro  $\beta$  en todo el rango de velocidad de aire evaluado. La mayor porosidad de este producto respecto a la zanahoria o el caqui hace que, a pesar de la disminución de la energía acústica por la velocidad del aire, los efectos son apreciables incluso a altas velocidades de aire.

Por el contrario, en el parámetro  $\alpha$  del modelo de Weibull no se apreció ninguna tendencia por la aplicación de ultrasonidos (Figura 4.4.15).

Los resultados obtenidos con el modelo de Weibull coinciden con los mostrados a partir de los modelos difusionales. Por lo tanto, este modelo empírico permite verificar que las conclusiones extraídas no dependen del modelo utilizado. Además, el modelo de Weibull ha ajustado de forma adecuada las cinéticas de secado. Los porcentajes de varianza explicada obtenidos fueron en todos los casos superiores al 99 % (Tablas A3.5, A3.6, A3.7 y A3.8) y, por tanto, próximos a los obtenidos con el modelo RE y superiores a los del modelo SRE. Como ilustración se muestran en la Figura 4.4.16 los valores del contenido de humedad calculados con el modelo de Weibull y el modelo SRE frente a los valores experimentales.

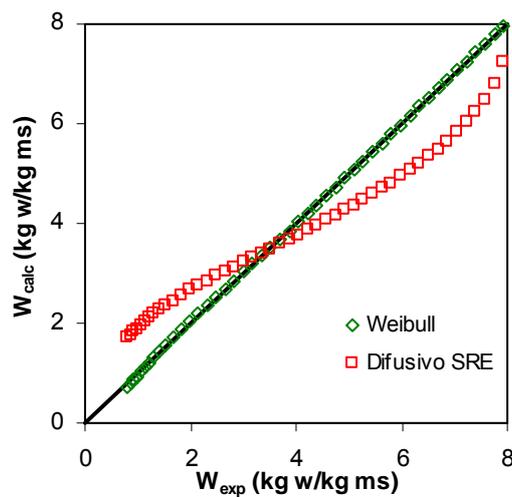


Figura 4.4.16. Valores experimentales y calculados con los modelos de Weibull y difusional SRE, secado de cubos de zanahoria (8.5 mm de lado). Experiencia SUS a 0.5 m/s y 40 °C.

#### **4.5. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DEL AIRE EN EL SECADO ASISTIDO POR ULTRASONIDOS DE POTENCIA**

En el apartado anterior de este trabajo se ha mostrado el efecto que tienen, tanto la velocidad del aire como el propio material, en el secado convectivo asistido por ultrasonidos de potencia. Resulta pertinente también estudiar otras variables, como la temperatura, que puedan influir en el efecto de la aplicación de ultrasonidos durante el secado convectivo (Gallego-Juárez, 1998; Gallego-Juárez et al., 1999), tal y como se desprendió de la revisión bibliográfica realizada.

Aunque en este apartado se analizará la influencia que tiene la temperatura en el secado acústico, los resultados obtenidos sobre el efecto de la velocidad del aire deben tenerse en cuenta de cara a interpretar el efecto de la nueva variable en estudio. Es por ello que en este caso, todas las experiencias de secado se realizaron a bajas velocidades de aire para evitar una excesiva perturbación del campo acústico por el flujo de aire, y poder así evaluar la influencia de la temperatura.

##### **4.5.1. Secado de zanahoria a diferentes temperaturas**

Las experiencias de secado se desarrollaron con cubos de zanahoria de 8.5 mm de lado a 5 niveles diferentes de temperatura 30, 40, 50, 60 y 70 °C. La velocidad del aire seleccionada fue de 1 m/s. En la Figura 4.5.1 se muestran las cinéticas de secado experimentales de las experiencias SUS, y en la Figura 4.5.2 las realizadas aplicando una potencia ultrasónica de 75 W (US). Para cada una de las diferentes condiciones experimentales se realizaron al menos tres repeticiones.

El lote de zanahorias utilizado en estas experiencias presentó un contenido de humedad inicial de  $8.26 \pm 0.45$  kg w/kg ms considerado como de humedad crítica al no encontrarse ningún periodo de velocidad de secado constante.

En ambos tipos de experiencias se observó que la velocidad de secado se incrementó a medida que aumentó la temperatura. En la Figura 4.5.1 se muestra que el tiempo necesario para alcanzar un contenido de humedad de 1 kg w/kg ms fue de 25000 s en las experiencias SUS realizadas a 30 °C. Dicho tiempo se redujo a 8000 s cuando la temperatura aumentó hasta 70 °C. Un efecto muy similar de la temperatura del aire se encontró en las experiencias US, aunque en este caso las diferencias entre las cinéticas de secado realizadas a 30 y 70 °C fueron menores que en el caso de las experiencias SUS (Figuras 4.5.1 y 4.5.2).

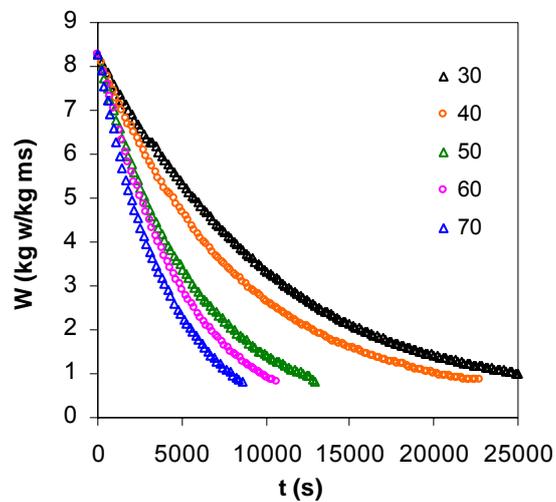
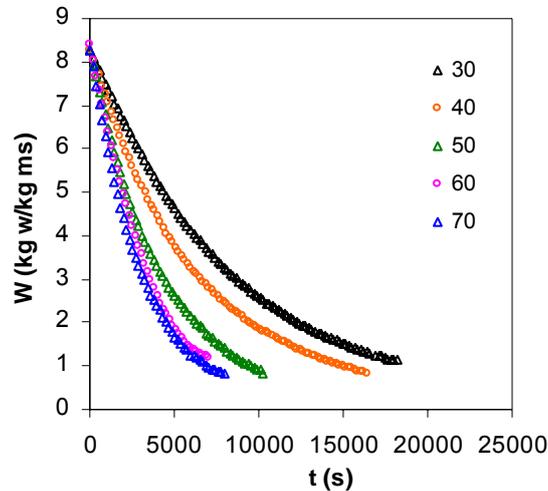


Figura 4.5.1. Secado de cubos de zanahoria (8.5 mm de lado) a 1 m/s y diferentes temperaturas (°C), sin aplicación de ultrasonidos (SUS).



**Figura 4.5.2. Secado de cubos de zanahoria (8.5 mm de lado) a 1 m/s y diferentes temperaturas (°C), con aplicación de ultrasonidos (US, 75 W, 21.7 kHz).**

En cuanto al efecto de los ultrasonidos de potencia sobre la cinética de secado, éste se vio influenciado por la temperatura. En la Figura 4.5.3 se muestra cómo en las experiencias realizadas a 30 °C la aplicación de ultrasonidos redujo el tiempo necesario para alcanzar un contenido de humedad de 1 kg w/kg ms desde 25000 s (experiencias SUS) a 18000 s (experiencias US). Sin embargo, estas diferencias prácticamente desaparecieron cuando la temperatura de secado aumentó hasta 70 °C.

El efecto de la temperatura en el secado acústico ha sido abordado anteriormente por otros autores. Gallego-Juárez et al. (1999) secaron láminas de zanahoria utilizando un sistema de aplicación ultrasónico sin contacto directo (20 kHz, 155 dB) a diferentes temperaturas experimentales (60, 90 y 115 °C) y 1.3 m/s de velocidad de aire con y sin la aplicación de ultrasonidos. La influencia de los ultrasonidos en la pérdida de peso del producto durante el secado disminuyó a medida que la temperatura fue más elevada, desapareciendo a 115 °C. Los resultados de Gallego-Juárez et al. (1999) son similares a los obtenidos en el presente trabajo, aunque en el trabajo de estos autores el umbral a partir del cuál los ultrasonidos dejaron de influir en el proceso fue más elevado, probablemente

debido a la diferente forma de aplicación ultrasónica y de circulación del aire. Al mismo tiempo, estos autores también realizaron experiencias de secado a 22 °C con el mismo sistema de aplicación ultrasónica pero con contacto directo entre el elemento vibrante y las muestras y además, aplicando una ligera presión estática. A pesar de la baja temperatura utilizada, la cinética del proceso fue mucho más rápida que en las experiencias sin contacto directo entre las muestras y los elementos vibrantes lo que muestra la importancia de conseguir una buena transmisión de la energía acústica al material que se está tratando. Nakagawa et al. (1996) realizaron experiencias de secado de láminas de surimi con aire caliente utilizando un sistema de aplicación ultrasónico sin contacto directo (19.5 kHz, 155 dB) a diferentes temperaturas experimentales (20, 30, 40 y 50 °C). Estos autores encontraron que la cinética del proceso aumentó en todo el rango de temperatura evaluado por la aplicación de los ultrasonidos de potencia. Sin embargo, las diferencias entre las experiencias realizadas con y sin aplicación de ultrasonidos de potencia también disminuyeron a medida que aumentó la temperatura.

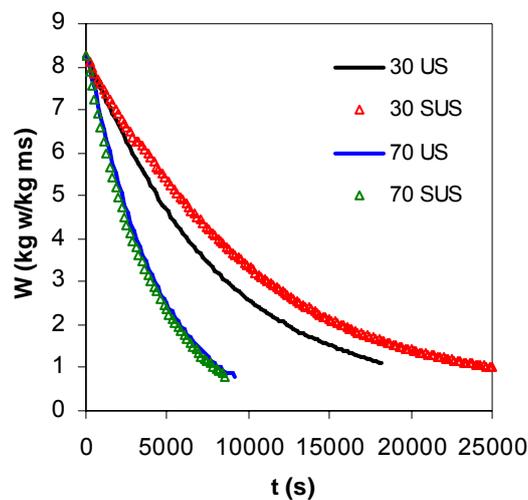


Figura 4.5.3. Secado de cubos de zanahoria (8.5 mm de lado). Experiencias SUS y US.

A partir del análisis de las cinéticas de secado sólo se puede mostrar el efecto de la temperatura en el secado acústico. Para cuantificar los efectos a diferentes temperaturas de la aplicación de ultrasonidos es necesario recurrir a la

modelización de las cinéticas de secado. En los siguientes apartados se muestran los resultados obtenidos con los modelos planteados para cumplir con dicho objetivo.

#### 4.5.2. Modelo SRE. Influencia de la temperatura

Las cinéticas de secado de zanahoria obtenidas a diferentes temperaturas experimentales se modelizaron utilizando un modelo difusional aplicado a una geometría cúbica ( $2L = 8.5 \text{ mm}$ ) sin considerar la resistencia externa a la transferencia de materia (modelo SRE) (Tabla 4.5.1).

T (°C)	SUS		US	
	$D_e$ ( $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ )	VAR (%)	$D_e$ ( $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ )	VAR (%)
30	$1.02 \pm 0.06_a$	89.2	$1.26 \pm 0.03_b$	89.5
40	$1.35 \pm 0.02_a$	91.9	$1.84 \pm 0.05_b$	89.9
50	$1.88 \pm 0.26_{ab}$	88.1	$2.57 \pm 0.13_{bc}$	88.4
60	$2.29 \pm 0.18_b$	89.3	$2.74 \pm 0.52_{bc}$	87.0
70	$3.02 \pm 0.13_{bc}$	89.2	$3.06 \pm 0.55_c$	90.6

**Tabla 4.5.1. Modelización de las cinéticas de secado de zanahoria, modelo SRE. Experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz) a 1 m/s.** Los subíndices a, b y c muestran grupos homogéneos establecidos a partir de los intervalos LSD ( $p < 0.05$ ).

En las experiencias de secado, se consideró un único periodo difusional (Figura A4.1). A medida que se incrementó la temperatura del aire de secado, la difusividad efectiva aumentó para ambos tipos de experiencias (SUS y US). Así la difusividad identificada en las experiencias SUS a 70 °C fue tres veces superior que a 30 °C. Los valores de  $D_e$  coinciden con los mostrados en este trabajo para otras series experimentales en anteriores apartados, así como también con los obtenidos por otros autores para este mismo producto (Srikiatden y Roberts, 2006; Ruiz-López et al., 2004; Mulet et al., 1989a).

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) multifactorial para la evaluar si los valores identificados de la difusividad efectiva fueran significativamente diferentes ( $p < 0.05$ ). Los factores considerados en este análisis fueron la temperatura del aire de secado (5 niveles: 30, 40, 50, 60 y 70 °C) y la aplicación de ultrasonidos de potencia (2 niveles: con o sin la aplicación de ultrasonidos). A partir del cálculo de los intervalos LSD se identificaron los niveles significativamente diferentes.

La aplicación de ultrasonidos de potencia aumentó significativamente ( $p < 0.05$ ) los valores de difusividad efectiva en el rango de temperaturas más bajas no siendo significativo ( $p < 0.05$ ) el aumento para temperaturas superiores a 60 °C.

Tal y como era de esperar por la baja velocidad de aire utilizada en estas experiencias (1 m/s), el modelo difusional SRE no resultó preciso para modelizar las cinéticas de secado de zanahoria, como indican los bajos porcentajes de varianza explicada, cercanos al 90 %. Además, se puede observar en las Figura 4.5.4 y A4.2 cómo la tendencia de los valores experimentales y calculados con el modelo SRE es muy diferente. Los resultados del Apartado 4.4.3 han mostrado que para velocidades de aire bajas, como es 1 m/s, la resistencia externa a la transferencia de materia no fue despreciable frente a la resistencia interna. Dichos resultados también han puesto de manifiesto la necesidad de considerar la resistencia externa en la modelización (modelo RE) para obtener un ajuste adecuado de los datos experimentales. La utilización del modelo difusional SRE, a pesar de conocer previamente sus limitaciones, es interesante porque los valores de difusividad efectiva identificados con este modelo se utilizarán como valores iniciales en la identificación de los parámetros del modelo RE.

Mulet et al. (2003a) modelizaron las experiencias realizadas por Gallego-Juárez et al. (1999) de secado de láminas de zanahoria aplicando ultrasonidos sin contacto directo entre el elemento vibrante y las muestras. Los valores de difusividad efectiva identificados por estos autores con un modelo difusional sin considerar la resistencia externa (Tabla 4.5.2) fueron superiores a los obtenidos en este trabajo (Tabla 4.5.3), y también mostraron el habitual aumento de la

difusividad efectiva con la temperatura. La aplicación de ultrasonidos aumentó la difusividad efectiva en las experiencias a 60 y 90 °C, aunque la influencia desapareció para una temperatura de 115 °C.

T (°C)	D <sub>e</sub> (10 <sup>-10</sup> m <sup>2</sup> /s)	
	SUS	US
60	7.4	10.3
90	17.3	21.5
115	31.5	31.5

**Tabla 4.5.2. Valores de difusividad efectiva identificados por Mulet et al. (2003a) a partir de datos experimentales de Gallego-Juárez et al. (1999). Secado láminas de zanahoria con (US) y sin (SUS) aplicación de ultrasonidos.**

#### **4.5.3. Modelo RE. Influencia de la temperatura**

Las cinéticas de secado de zanahoria obtenidas a diferentes temperaturas experimentales también se modelizaron utilizando un modelo difusional considerando la resistencia externa a la transferencia de materia. El modelo se formuló teniendo en cuenta la geometría cúbica de las muestras (2L = 8.5 mm) y se resolvió aplicando el método de diferencias finitas a partir de una serie de funciones realizadas en Matlab (Anejo 8). Los resultados de la modelización se muestran en la Tabla 4.5.3.

Tal y como era de esperar, y coincidiendo con los resultados anteriormente expuestos, el modelo RE planteado se ajustó de forma adecuada a los datos experimentales como muestran los elevados porcentajes de varianza explicada obtenidos, en todos los casos superiores al 99.8 %. Igualmente el error medio relativo se mantuvo siempre por debajo del 3 %. Como ilustración en las Figuras 4.5.4 y A4.2 se comparan los resultados obtenidos en la modelización con los modelos SRE y RE para una cinética de secado en particular. Como se puede observar, el modelo RE describió perfectamente la tendencia de los resultados durante el secado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

T (°C)	SUS				US			
	D <sub>e</sub> (10 <sup>-10</sup> m <sup>2</sup> /s)	k (10 <sup>-4</sup> kg w/m <sup>2</sup> /s)	VAR (%)	EMR (%)	D <sub>e</sub> (10 <sup>-10</sup> m <sup>2</sup> /s)	k (10 <sup>-4</sup> kg w/m <sup>2</sup> /s)	VAR (%)	EMR (%)
30	1.38±0.25 <sub>a</sub>	2.87±0.40 <sub>w</sub>	99.9	1.1	2.14±0.60 <sub>b</sub>	3.06±0.36 <sub>x</sub>	99.9	1.8
40	1.93±0.22 <sub>a</sub>	4.13±0.21 <sub>wx</sub>	99.9	0.9	2.71±0.51 <sub>b</sub>	5.86±0.48 <sub>y</sub>	99.9	1.4
50	2.87±0.70 <sub>b</sub>	6.17±0.86 <sub>y</sub>	99.9	1.4	3.91±0.33 <sub>bc</sub>	8.80±0.50 <sub>z</sub>	99.9	1.3
60	3.83±0.61 <sub>bc</sub>	6.77±0.23 <sub>y</sub>	99.9	1.5	4.69±0.40 <sub>c</sub>	9.07±1.27 <sub>z</sub>	99.9	2.5
70	4.57±0.07 <sub>c</sub>	8.83±0.38 <sub>z</sub>	99.9	2.1	4.88±0.41 <sub>c</sub>	9.40±0.70 <sub>z</sub>	99.9	1.6

Tabla 4.5.3. Modelización de las cinéticas de secado de zanahoria, modelo RE. Experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz) a 1 m/s. Los subíndices (a, b, c, d) y (w, x, y, z) muestran grupos homogéneos establecidos a partir de los intervalos LSD (p<0.05).

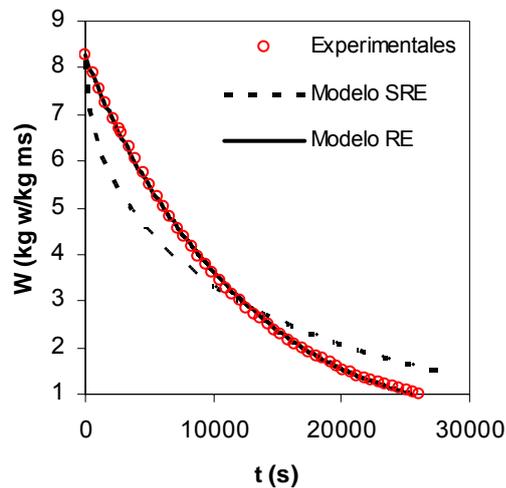


Figura 4.5.4. Cinéticas de secado de zanahoria, modelos SRE y RE. Experiencia SUS, 1 m/s y 30 °C.

En los valores medios de la difusividad efectiva y el coeficiente de transferencia de materia se puede apreciar la influencia tanto de la temperatura como de la aplicación de ultrasonidos de potencia (Tabla 4.5.3). Con el objetivo de evaluar la significación de esta influencia se recurrió al análisis de la varianza (ANOVA). Por un lado, se realizó un ANOVA multifactorial para evaluar la significación (p<0.05) de las diferencias entre los distintos valores identificados de

la difusividad efectiva. Los factores considerados en este análisis fueron la temperatura del aire de secado (5 niveles: 30, 40, 50, 60 y 70 °C) y la aplicación de ultrasonidos de potencia (2 niveles: con o sin la aplicación de ultrasonidos). Por otro lado, se realizó un ANOVA similar considerando el coeficiente de transferencia de materia como variable dependiente.

El resultado del análisis de la varianza indicó que ambos parámetros del modelo RE ( $D_e$  y  $k$ ) se vieron afectados de forma significativa ( $p < 0.05$ ) por la temperatura de secado en el rango experimental evaluado en este trabajo. Por un lado, el incremento de la difusividad efectiva con la temperatura sugiere un descenso de la resistencia interna a la transferencia de materia. Por otro lado, el aumento del coeficiente de transferencia de materia con la temperatura sugiere, a su vez, también un ligero descenso de la resistencia externa a la transferencia de materia.

Los valores medios de la difusividad efectiva y el coeficiente de transferencia de materia mostraron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) por la aplicación de ultrasonidos considerando todo el rango experimental evaluado (30-70 °C). Aunque, si se realiza el análisis considerando por separado altas (60 y 70 °C) y bajas temperaturas (30, 40 y 50 °C), se puede observar que, mientras en las temperaturas altas no se dan diferencias significativas entre aplicar o no ultrasonidos, en el rango 30-50 °C sí que las diferencias son estadísticamente significativas. Por lo tanto, la influencia de los ultrasonidos de potencia en los procesos de transferencia de materia que tienen lugar durante el secado convectivo de cubos de zanahoria fue únicamente significativa para temperaturas de secado bajas (Tabla 4.5.3). La tendencia de los resultados coincide con la establecida por Mulet et al. (2003a) en cuanto al efecto de los ultrasonidos.

Al igual que ocurría en el caso de la influencia de la velocidad del aire en la transferencia de materia, para evaluar la fiabilidad de los resultados y evitar artificios matemáticos se recurrió a una relación empírica para describir la influencia de la temperatura en el coeficiente de transferencia de materia (Perry y Green, 1997) (Apartado 3.6.5). Según dicha correlación debería encontrarse una

relación lineal entre el logaritmo neperiano de  $k$  y la inversa de la temperatura ( $1/T$ ).

Los valores del coeficiente de transferencia de materia identificados a partir del modelo RE fueron similares a los obtenidos a partir de la correlación propuesta por Perry y Green (1997) (Figura A4.3). Los valores identificados en las experiencias SUS siguen la relación lineal prevista, aunque la pendiente es superior a la determinada con la correlación. Este hecho indica que el efecto de la temperatura sobre este parámetro fue superior al esperado, lo que puede deberse a las diferencias entre las condiciones experimentales utilizadas en este trabajo y las usadas para establecer la correlación. Por ejemplo, como que en este caso el aire alrededor de las muestras no se encontraba en reposo. Las diferencias también pueden deberse a la suposición de considerar una esfera de igual volumen que los cubos de zanahoria.

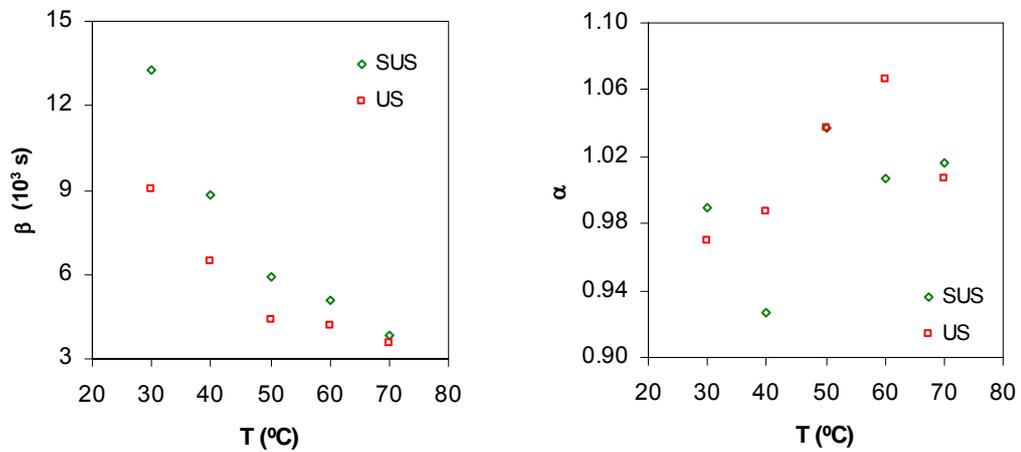
Al contrario que en el caso de las experiencias SUS, los valores del coeficiente de transferencia de materia identificados en las experiencias US no se ajustan de forma adecuada a la correlación propuesta por Perry y Green (1997) (Figura A4.3). La relación lineal esperada entre  $\ln k$  y  $1/T$  no se cumple debido a la disminución de la influencia de los ultrasonidos de potencia a temperaturas altas. A bajas temperaturas, 30-50 °C, sí se obtiene una recta paralela a la de las experiencias SUS. El efecto de los ultrasonidos se manifiesta en estas temperaturas a través de un desplazamiento de la ordenada en el origen.

#### 4.5.4. Modelo de Weibull. Influencia de la temperatura

Las cinéticas de secado de cubos de zanahoria obtenidas a diferentes temperaturas experimentales se modelizaron también con el modelo de Weibull (Tabla A4.1) para comprobar que las conclusiones obtenidas con los modelos difusionales respecto a la influencia de la temperatura en el secado acústico se vuelven a identificar con un modelo matemático diferente.

El parámetro cinético ( $\beta$ ) del modelo de Weibull se vio afectado de forma significativa ( $p < 0.05$ ) por la temperatura del aire de secado (Tabla A4.1). A medida que la temperatura de secado fue más alta, este parámetro disminuyó debido a su relación inversa con la velocidad del proceso (Figura 4.5.5) (Cunha et al., 1998; Simal et al., 2005a; Blasco et al., 2006). El efecto se encontró en ambos tipos de experiencias (SUS y US). Por el contrario, no se observó una tendencia clara del parámetro de forma ( $\alpha$ ) del modelo de Weibull respecto a la temperatura, coincidiendo con los resultados de otros autores (Blasco et al., 2006) (Figura 4.5.5).

La aplicación de ultrasonidos de potencia influyó de forma significativa ( $p < 0.05$ ) en el parámetro  $\beta$ . Los valores de dicho parámetro en las experiencias US fueron menores que los identificados en las experiencias SUS. Este hecho indica que la aplicación ultrasónica aumentó la velocidad de secado. En la Figura 4.5.5 se puede observar como a medida que la temperatura de secado aumentó las diferencias entre los valores medios del parámetro  $\beta$  para las experiencias SUS y US disminuyeron hasta ser prácticamente despreciables para la temperatura de 70 °C. Por el contrario, el parámetro  $\alpha$  no fue afectado de forma significativa ( $p < 0.05$ ) por la aplicación de ultrasonidos de potencia.



**Figura 4.5.5. Influencia de la temperatura del aire en los parámetros del modelo de Weibull ( $\alpha$  y  $\beta$ ), secado de zanahoria. Experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz) a 1 m/s.**

El modelo de Weibull ha mostrado su capacidad para describir adecuadamente las cinéticas de secado en estas condiciones experimentales. Los porcentajes de varianza explicados (Tabla A4.1) fueron en todos los casos superiores al 99 %, es decir muy similares a los obtenidos con el modelo difusional RE y superiores, por tanto, a los obtenidos con el modelo SRE. En la Figura 4.5.6 se muestra la concordancia entre los contenidos medios de humedad experimentales y calculados con el modelo de Weibull. Al mismo tiempo, se compara dicha tendencia con la que proporciona el modelo SRE.

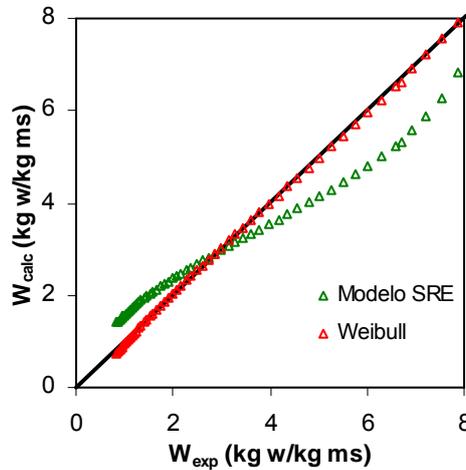
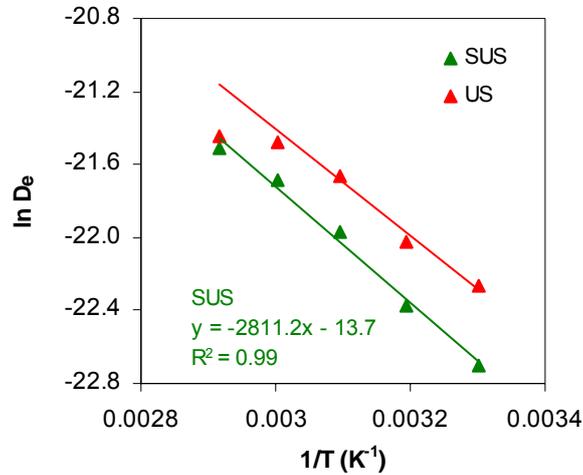


Figura 4.5.6. Contenido de humedad experimental y calculado con los modelos SRE y Weibull, secado de zanahoria. Experiencia SUS a 1 m/s y 30 °C.

#### 4.5.5. Estimación de la energía de activación. Influencia de la aplicación de ultrasonidos de potencia

En la bibliografía, la ecuación tipo Arrhenius (Ec. 3.6.13) es la relación matemática más frecuentemente utilizada para describir la influencia de la temperatura en la difusividad efectiva de los modelos difusionales utilizados para la modelización de cinéticas de secado. Si se utilizan modelos empíricos la relación se establece entre la temperatura y el parámetro cinético correspondiente. En el caso de Weibull el parámetro seleccionado es  $1/\beta$ , dada la relación inversa de  $\beta$  con la cinética del proceso (Ec. 3.6.14). En la Figura 4.5.7 se muestra la relación entre el logaritmo neperiano de los valores medios de difusividad efectiva identificados con el modelo RE y la inversa de la temperatura. En las Figuras A4.4 y A4.5 se muestran representaciones similares con los parámetros del modelo difusional SRE y del modelo de Weibull respectivamente.



**Figura 4.5.7. Variación de  $D_e$  con la temperatura, modelo RE. Secado de cubos de zanahoria, experiencias US (75 W, 21.7 kHz) y SUS.**

Como se observa en dichas figuras, la relación entre los parámetros cinéticos de los diferentes modelos y la temperatura se ajusta de forma adecuada a la expresión de Arrhenius en las experiencias SUS. Los valores de energía de activación identificados en estas experiencias fueron con el modelo difusional SRE  $23.4 \pm 2.4$  kJ/mol, con el modelo difusional RE  $26.6 \pm 5.3$  kJ/mol y con el modelo de Weibull  $26.4 \pm 6.5$  kJ/mol. Estos valores son similares a los obtenidos en este trabajo en la experiencias de lecho fluidizado de zanahoria (Apartado 4.3.4), así como los mostrados en la bibliografía por diferentes autores para este producto (Tabla A2.1).

En las experiencias en las que se aplicaron ultrasonidos de potencia la relación de los parámetros cinéticos con la temperatura no siguió la expresión de Arrhenius en todo el rango de temperaturas. La influencia de los ultrasonidos en la difusividad efectiva disminuyó a medida que aumentó la temperatura del proceso, y prácticamente fue despreciable a 70 °C. Por lo tanto, hay un descenso de la influencia de los ultrasonidos de potencia en la resistencia interna a la transferencia de materia a medida que se incrementa la temperatura. La aplicación de ultrasonidos introduce una determinada cantidad de energía en el sólido

afectando a la movilidad del agua, posiblemente debido a los efectos estructurales de los ultrasonidos (efecto esponja) o a efectos en las interfases sólido-gas de los espacios intercelulares. A medida que la temperatura aumenta, la movilidad del agua aumenta y, por tanto, el valor relativo de la aportación energética debida a los ultrasonidos disminuye. Esta puede ser una de las razones por la cuál el efecto de los ultrasonidos disminuyó al aumentar la temperatura. Sería necesaria una mayor experimentación para validar esta hipótesis.

#### **4.6. INFLUENCIA DE LA DENSIDAD DE CARGA MÁSCICA EN EL SECADO ASISTIDO POR ULTRASONIDOS DE POTENCIA**

La densidad de carga másica es otro de los parámetros que pueden influir en el proceso de secado y, por lo tanto, en la influencia de la aplicación de los ultrasonidos de potencia en el mismo. Dada una determinada cantidad de energía ultrasónica, si aumenta la cantidad de masa de partículas presente en el medio, el ratio energía/unidad de masa se hace menor. Este hecho disminuye la probabilidad de que la aplicación de ultrasonidos produzca cualquier tipo de modificación en el sistema. Por lo tanto, parece evidente suponer que, a partir de un determinado umbral de densidad de carga másica en la cámara de secado, los efectos de los ultrasonidos en el proceso de secado disminuirán al aumentar la densidad de carga, pudiendo incluso desaparecer con densidades de carga muy elevadas. Con el objetivo de evaluar la influencia de esta variable en el secado acústico, se planificaron experiencias de secado variando la densidad de carga en un amplio rango.

##### **4.6.1. Secado de zanahoria a diferentes densidades de carga másica**

Se realizaron experiencias de secado de cubos de zanahoria de 8.5 mm de lado a 11 niveles diferentes de densidad de carga: 12, 24, 36, 42, 48, 60, 72, 84, 96, 108 y 120 kg/m<sup>3</sup>. La velocidad del aire seleccionada fue de 1 m/s y la temperatura de 40 °C. Las condiciones de velocidad de aire y temperatura se escogieron en función de los resultados obtenidos en los apartados anteriores. En la Figura 4.6.1 se muestran las cinéticas de secado experimentales en las que no se aplicaron ultrasonidos de potencia (SUS), y en la Figura 4.6.2 las realizadas con ultrasonidos aplicando una potencia de 75 W (US). Para cada una de las distintas condiciones experimentales ensayadas se realizaron, al menos, tres repeticiones.

El lote de zanahorias utilizado en estas experiencias presentó un contenido de humedad inicial de  $8.26 \pm 0.45$  kg w/kg ms, considerándose ésta como humedad crítica al no encontrarse ningún periodo de velocidad de secado constante.

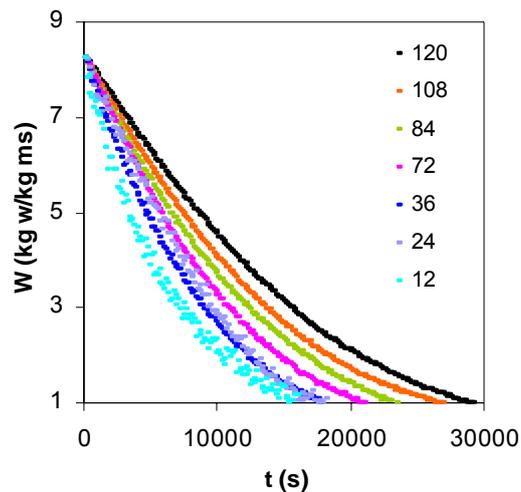
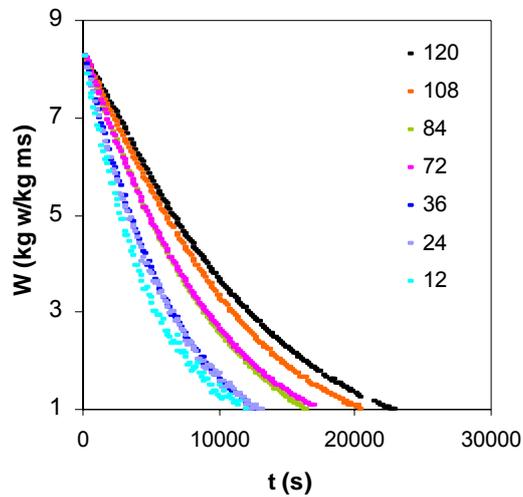


Figura 4.6.1. Secado de zanahoria a diferentes densidades de carga ( $\text{kg/m}^3$ ). Experiencias SUS, 1 m/s y 40 °C.

A partir de los resultados experimentales, se observó una influencia clara de la densidad de carga másica en las cinéticas de secado de zanahoria. La velocidad de secado disminuyó a medida que aumentó la carga de partículas presente en la cámara de secado. En la Figura 4.6.1 se muestra cómo, en las experiencias SUS, el tiempo necesario para alcanzar un contenido de humedad de 1 kg w/kg ms fue cercano a los 30000 s para una densidad de carga de  $120 \text{ kg/m}^3$ , mientras que con una densidad de carga de  $12 \text{ kg/m}^3$  dicho tiempo se redujo a la mitad. Un comportamiento similar se pudo observar en las experiencias US (Figura 4.6.2). Resultados similares a los aquí mostrados fueron obtenidos por Wang y Xi (2005) en el secado de láminas de zanahoria utilizando microondas.



**Figura 4.6.2. Secado de zanahoria a diferentes densidades de carga ( $\text{kg/m}^3$ ). Experiencias US (75 W, 21.7 kHz), 1 m/s y 40 °C.**

Los resultados experimentales también mostraron cómo la aplicación de ultrasonidos de potencia influyó en las cinéticas de secado (Figura 4.6.3). Tal y como era esperado dadas las condiciones de velocidad y temperatura del aire utilizadas (1 m/s, 40 °C), la aplicación de ultrasonidos de potencia aumentó la velocidad de secado. En la Figura 4.6.3 se observa que el tiempo de secado necesario para alcanzar un contenido de humedad de 1  $\text{kg w/kg ms}$  fue cercano a 30000 s para una densidad de carga de 12  $\text{kg/m}^3$  en las experiencias SUS, mientras que con la aplicación de ultrasonidos dicho tiempo se redujo a 22000 s. La influencia de los ultrasonidos fue importante tanto a bajas como a altas densidades de carga (Figura 4.6.3).

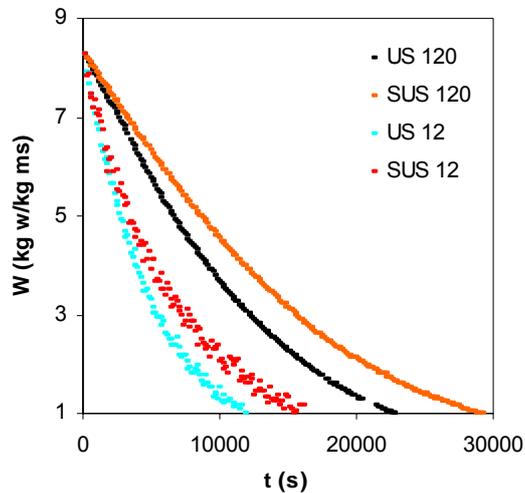


Figura 4.6.3. Secado de zanahoria a diferentes densidades de carga ( $\text{kg/m}^3$ ). Experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz).

De cara a cuantificar la influencia tanto de la densidad de carga como de la aplicación de ultrasonidos de potencia, se recurrió a la modelización de las cinéticas de secado. A continuación se muestran los resultados obtenidos de la modelización de las cinéticas de secado con modelos difusionales y con el modelo de Weibull.

#### 4.6.2. Modelo SRE. Influencia de la densidad de carga

Para la evaluación de la influencia de la densidad de carga en el secado de cubos de zanahoria ( $2L = 8.5$  mm), se utilizó el modelo difusional aplicado a una geometría cúbica sin considerar la resistencia externa a la transferencia de materia (modelo SRE) (Tabla 4.6.1). En los apartados anteriores se ha mostrado que para las condiciones de velocidad de aire utilizadas en estas experiencias, 1 m/s, la resistencia externa a la transferencia de materia no es despreciable frente a la resistencia interna. Sin embargo, los valores de difusividad efectiva identificados con el modelo SRE pueden resultar muy útiles si se utilizan como

valores iniciales en la aplicación de modelos difusionales más complejos. Los valores de difusividad efectiva mostrados en la Tabla 4.6.1 representan las medias de los valores identificados en las 3 repeticiones realizadas para cada una de las condiciones experimentales ensayadas.

Densidad de carga (kg/m <sup>3</sup> )	SUS		US	
	D <sub>e</sub> (10 <sup>-10</sup> m <sup>2</sup> /s)	VAR (%)	D <sub>e</sub> (10 <sup>-10</sup> m <sup>2</sup> /s)	VAR (%)
12	1.49±0.13 <sub>a</sub>	92.0	1.83±0.09 <sub>b</sub>	90.1
24	1.39±0.07 <sub>ac</sub>	88.4	1.70±0.22 <sub>ab</sub>	86.5
36	1.22±0.19 <sub>ac</sub>	87.9	1.67±0.19 <sub>ab</sub>	88.2
42	1.13±0.10 <sub>c</sub>	87.1	1.57±0.23 <sub>ab</sub>	87.4
48	1.12±0.18 <sub>c</sub>	88.8	1.51±0.23 <sub>b</sub>	88.9
60	1.04±0.05 <sub>cd</sub>	83.9	1.31±0.08 <sub>c</sub>	84.9
72	0.91±0.14 <sub>cd</sub>	87.7	1.30±0.06 <sub>c</sub>	86.4
84	0.78±0.15 <sub>d</sub>	86.6	1.20±0.10 <sub>c</sub>	85.7
96	0.72±0.21 <sub>d</sub>	88.3	1.14±0.15 <sub>c</sub>	88.2
108	0.74±0.18 <sub>d</sub>	83.5	1.02±0.06 <sub>cd</sub>	81.9
120	0.75±0.06 <sub>d</sub>	83.4	0.99±0.06 <sub>cd</sub>	83.2

**Tabla 4.6.1. Modelización de las cinéticas de secado de cubos de zanahoria (2L = 8.5 mm), modelo SRE. Experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz) a 40 °C y 1 m/s.** Los subíndices a, b, c y d muestran grupos homogéneos establecidos a partir de los intervalos LSD (p<0.05).

En la Tabla 4.6.1 se observa que la densidad de carga influyó en la difusividad efectiva identificada con el modelo SRE. Los valores de D<sub>e</sub> se redujeron a aproximadamente la mitad cuando la densidad de carga aumentó de 12 a 120 kg/m<sup>3</sup>. El efecto fue similar en las experiencias SUS y US.

La difusividad representa la facilidad del agua para transferirse por el interior del sólido, por lo tanto no debería verse afectada por el aumento de la densidad de partículas colocadas en la cámara de secado. Sin embargo, el aumento de la densidad de carga sí que afecta a las características de la circulación del aire alrededor de las muestras, y por lo tanto, a la resistencia externa a la transferencia

de materia. La difusividad efectiva identificada con el modelo SRE también incluye este efecto, al tratarse ésta de un simple parámetro de ajuste (Mulet, 1994). Este hecho puede explicar la disminución de la difusividad efectiva a medida que aumenta la densidad de carga.

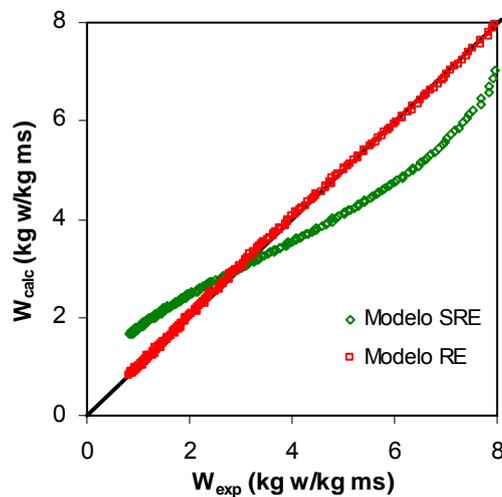
Por otro lado, la aplicación de ultrasonidos de potencia aumentó significativamente ( $p < 0.05$ ) los valores de difusividad efectiva identificados con el modelo SRE. La influencia se dio en todo el rango de densidad de carga másica evaluado, 12-120 kg/m<sup>3</sup>.

Tal y como era esperado, el modelo SRE no ajustó bien las cinéticas de secado obtenidas a diferentes densidades de carga. En las Figuras 4.6.4, A5.1 y A5.2 se muestra la diferente tendencia entre los valores experimentales y los calculados con este modelo. Los valores bajos de la varianza explicada alcanzados con el modelo SRE también sugieren que las hipótesis asumidas en este modelo no se correspondieron con las condiciones experimentales (Tabla 4.6.1). Además, dichos valores van disminuyendo de forma regular a medida que aumenta la densidad de carga. Este hecho puede considerarse como un aumento de la resistencia externa a la transferencia de materia, que indicaría que las hipótesis asumidas se alejan más del comportamiento real del proceso. En definitiva, en estas circunstancias el desarrollo y aplicación de un modelo difusional más complejo está completamente justificado.

#### **4.6.3. Modelo RE. Influencia de la densidad de carga**

A partir de los resultados experimentales y los obtenidos con la aplicación del modelo SRE, se consideró oportuno la utilización de un modelo difusional que considere la resistencia externa a la transferencia de materia (modelo RE). El modelo difusional planteado se formuló para una geometría cúbica ( $2L = 8.5$  mm) y se resolvió utilizando el método de diferencias finitas a partir de una serie de funciones implementadas en Matlab (Anejo 8).

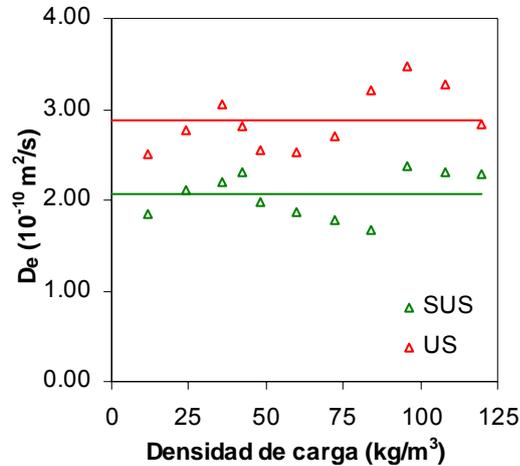
Tal y como era esperado, el modelo RE ajustó de forma adecuada los valores experimentales. Este aspecto queda reflejado en los porcentajes de varianza explicados superiores al 99 %, así como el error medio relativo, siempre inferior al 6 % (Tabla A5.1). Ambos índices dan muestra de la bondad del ajuste conseguido. En las Figuras 4.6.4 y A5.1 se puede apreciar la tendencia similar entre los valores del contenido de humedad experimental y los calculados con el modelo RE, y permiten comparar la bondad del ajuste con la obtenida con el modelo SRE.



**Figure 4.6.4. Contenido de humedad experimental y calculado con los modelos SRE y RE, secado de zanahoria. Experiencia SUS, 1 m/s, 40 °C y 60 kg/m<sup>3</sup>.**

En las Figuras 4.6.5 y 4.6.6 se muestran, respectivamente, los valores medios de la difusividad efectiva y el coeficiente de transferencia de materia identificados en cada una de las distintas condiciones experimentales ensayadas.

Se realizó un ANOVA multifactorial para evaluar si los valores identificados de la difusividad efectiva son significativamente diferentes ( $p < 0.05$ ). Los factores considerados en este análisis fueron la densidad de carga másica (11 niveles: 12, 24, 36, 42, 48, 60, 72, 84, 96, 108 y 120 kg/m<sup>3</sup>) y la aplicación de ultrasonidos de potencia (2 niveles: con o sin la aplicación de ultrasonidos).



**Figura 4.6.5. Influencia de la densidad de carga en la difusividad efectiva, modelo RE. Secado de zanahoria, experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz), 40 °C y 1 m/s.**

De los resultados de estos análisis se extrae que la difusividad efectiva no se vio afectada de forma significativa por la densidad de carga, tal y como era esperado al tratarse de un parámetro intrínseco del material (Figura 4.6.5). Sin embargo, la aplicación de ultrasonidos de potencia aumentó de forma significativa ( $p < 0.05$ ) el valor medio de este parámetro en las experiencias US ( $2.88 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ) respecto al obtenido en las experiencias SUS ( $2.06 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ).

En cuanto al coeficiente de transferencia de materia, el ANOVA multifactorial mostró que la densidad de carga y la aplicación de ultrasonidos de potencia afectaron de forma significativa ( $p < 0.05$ ) al valor de este parámetro. En la Figura 4.6.6 se puede observar cómo  $k$  disminuyó a medida que la densidad de carga aumentó. Esto sugiere un aumento de la resistencia externa con la densidad de carga y, por lo tanto, una reducción del coeficiente de transferencia de materia. La explicación de este hecho puede asociarse a perturbaciones en el flujo de aire por el aumento de partículas en las bandejas de secado, o bien por la creación de caminos preferenciales que dificultan el flujo de aire alrededor de los objetos. La aplicación de ultrasonidos de potencia aumentó de forma significativa ( $p < 0.05$ ) el

coeficiente de transferencia de materia en el rango de densidades de carga evaluado.

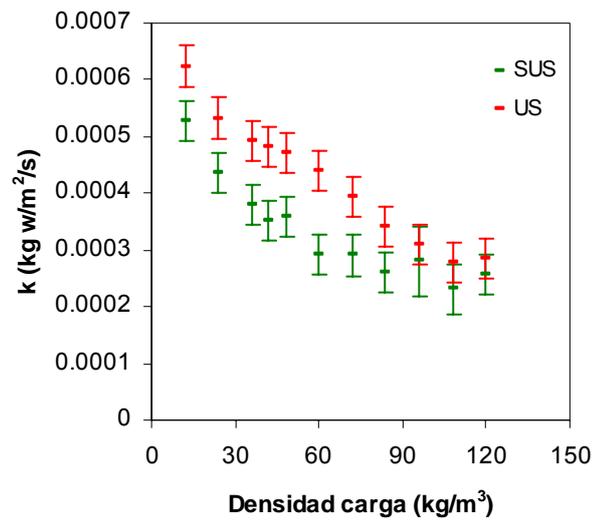


Figura 4.6.6. Valores medios de k e intervalos LSD ( $p < 0.05$ ), modelo RE. Experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz), 40 °C y 1 m/s.

A partir de densidades de carga superiores a 90 kg/m<sup>3</sup>, los valores medios del coeficiente de transferencia de materia para ambos tipos de experiencias (SUS y US) dejaron de ser significativamente diferentes ( $p < 0.05$ ) (Figura 4.6.6). Este hecho puede ser consecuencia de la disminución de la cantidad de energía ultrasónica que le llega a cada partícula debido al aumento de la masa presente en la cámara de secado. En este trabajo no se han podido utilizar densidades de carga superiores a 120 kg/m<sup>3</sup> ya que ésta corresponde con la cantidad máxima de partículas que fue posible colocar en las bandejas con una distribución de monocapa (Apartado 3.4.4).

#### 4.6.4. Modelo de Weibull. Influencia de la densidad de carga

Las cinéticas de secado experimentales de los cubos de zanahoria se estudiaron también a partir del ajuste del modelo de Weibull (Tabla A5.2) con el objetivo de completar y comparar los resultados obtenidos con los modelos difusionales.

La densidad de carga influyó de forma significativa ( $p < 0.05$ ) en los dos parámetros del modelo de Weibull. En la Figura 4.6.7 se puede observar que el valor de la inversa del parámetro  $\beta$  del modelo de Weibull disminuyó a medida que aumentó la densidad de carga másica, como consecuencia de la reducción de la velocidad de secado.

En el caso del parámetro de forma del modelo de Weibull ( $\alpha$ ), la influencia de la densidad de carga también fue apreciable.  $\alpha$  aumentó desde valores inferiores a 1, para las densidades de carga más bajas, hasta valores cercanos a 1.2 para las densidades de carga más altas. En el Apartado 4.4.5 se observó que este parámetro disminuyó a medida que la resistencia externa era despreciable frente a la interna. Por lo tanto, el aumento de la densidad de carga se podría considerar como un incremento de la resistencia externa a la transferencia de materia ocasionado muy probablemente por cambios en el flujo de aire.

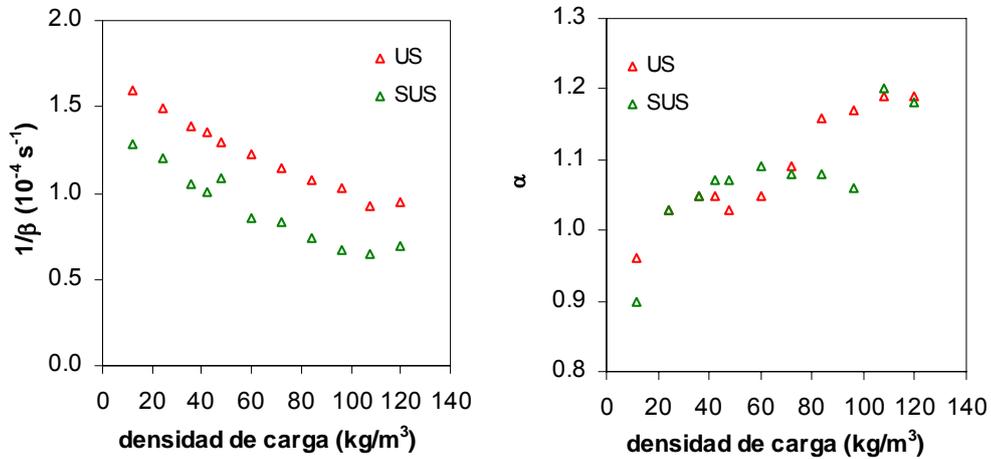


Figura 4.6.7. Influencia de la densidad de carga en los parámetros del modelo de Weibull ( $\alpha$  y  $\beta$ ), secado de zanahoria. Experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz), 1 m/s y 40 °C.

En cuanto a la aplicación de ultrasonidos de potencia, éstos aumentaron el valor de  $1/\beta$  en todo el rango de densidades de carga evaluado (Figura 4.6.7), lo que pone de manifiesto un incremento de la velocidad de secado. Sin embargo, en el parámetro  $\alpha$  del modelo de Weibull no se apreció ninguna influencia por la aplicación de ultrasonidos de potencia.

El modelo de Weibull se ajustó de forma adecuada a las cinéticas de secado obtenidas a diferentes densidades de carga másica (Tabla A5.2). Los porcentajes de varianza explicados, cercanos al 99 % para todas las experiencias, al igual que la tendencia similar observada entre los valores experimentales y calculados con el modelo de Weibull muestran la bondad del ajuste obtenido con este modelo (Figuras 4.6.8 y A5.2).

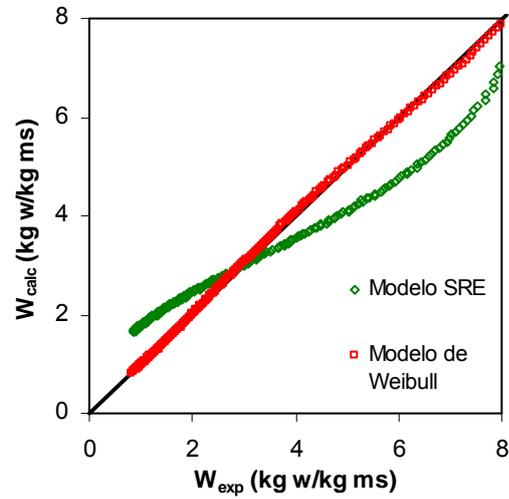


Figure 4.6.8. Contenido de humedad experimental y calculado con los modelos SRE y de Weibull. Secado de zanahoria, experiencia SUS a 1 m/s, 40 °C y 60 kg/m<sup>3</sup>.

#### **4.7. INFLUENCIA DEL NIVEL DE POTENCIA APLICADA EN EL SECADO ASISTIDO POR ULTRASONIDOS DE POTENCIA**

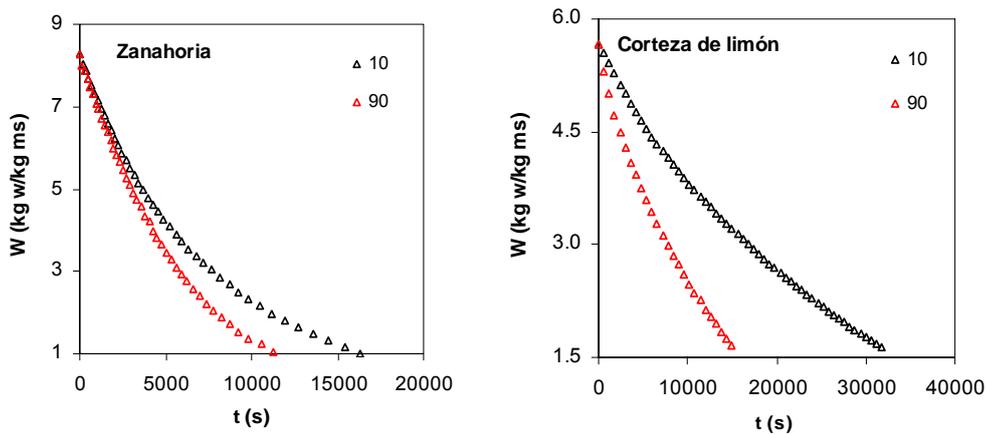
Otro de los parámetros de interés en el secado acústico es el efecto del nivel de potencia ultrasónica aplicado durante las experiencias de secado. La bibliografía muestra que, en determinados procesos, los efectos de los ultrasonidos no aparecen hasta que la intensidad ultrasónica supera un determinado umbral (Mulet et al. 2003b). A partir de este umbral los efectos de los ultrasonidos en el proceso parecen ser proporcionales al nivel de intensidad ultrasónica aplicado.

Con el objetivo de profundizar en el estudio de la influencia de este parámetro en el secado acústico se plantearon experiencias con dos productos con características diferentes, láminas de corteza de limón y cubos de zanahoria, variando el nivel de potencia ultrasónica aplicado. A partir de estas experiencias se podrá determinar si el efecto de la intensidad ultrasónica en el secado de alimentos es similar al mostrado en otros procesos de transferencia de materia. Además, al trabajar con dos productos diferentes se puede observar si las características del producto afectan al tratamiento.

##### **4.7.1. Secado acústico de zanahoria y corteza de limón a diferentes potencias**

Se realizaron experiencias de secado de cubos de zanahoria ( $2L = 8.5 \text{ mm}$ ) y láminas de corteza de limón ( $L = 7 \text{ mm}$ ) a  $40 \text{ °C}$  y  $1 \text{ m/s}$  variando la potencia eléctrica utilizada para excitar al transductor ultrasónico (en adelante potencia ultrasónica). Las densidades de carga utilizadas fueron de  $12 \text{ kg/m}^3$  para la zanahoria y  $36 \text{ kg/m}^3$  para la corteza de limón. En total se evaluaron 10 niveles diferentes de potencia: 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 y 90 W, para cada uno de los cuáles se realizaron, al menos, tres repeticiones.

El contenido de humedad inicial para las zanahorias fue de  $8.26 \pm 0.45$  kg w/kg ms y de  $5.69 \pm 0.43$  kg w/kg ms para la corteza de limón. En ambos productos no se encontró ningún periodo de velocidad de secado constante con lo el contenido de humedad inicial coincidió con la humedad crítica (Karathanos y Belesiottis, 1997).

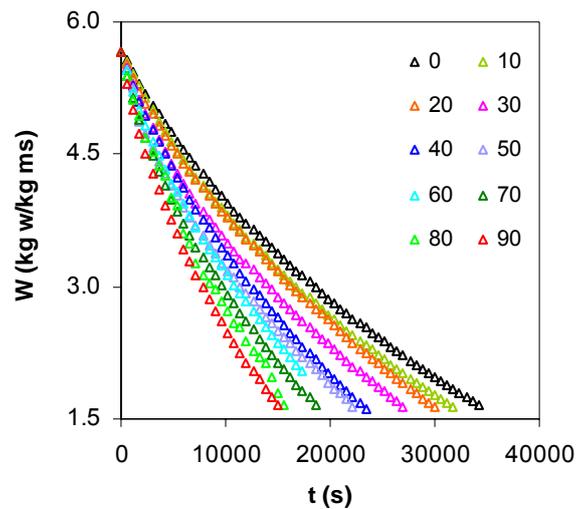


**Figura 4.7.1. Influencia de la potencia (W) en el secado de zanahoria ( $12 \text{ kg/m}^3$ ) y corteza de limón ( $36 \text{ kg/m}^3$ ) a 1 m/s y 40 °C.**

Se observó una clara influencia de la potencia ultrasónica aplicada en la cinética de secado de ambos productos (Figura 4.7.1). La velocidad de secado aumentó en las experiencias realizadas a altas potencias respecto a las realizadas a bajas. En el caso de la zanahoria, el tiempo necesario para alcanzar una humedad de 1.5 kg w/kg ms se redujo en un 32 % al aplicar una potencia de 90 W respecto del necesario cuando se aplicaron 10 W. En el caso de la corteza de limón, la reducción fue del 53 %. Resultados similares, en cuanto al efecto de la potencia ultrasónica aplicada, fueron obtenidos por Riera et al. (2002) y De la Fuente et al. (2003) en el secado acústico por contacto directo de manzana, patata, champiñón y zanahoria.

El efecto de los ultrasonidos en las experiencias de secado de corteza de limón fue proporcional al nivel de potencia ultrasónica aplicado en todo el rango

estudiado (Figura 4.7.2). Sin embargo, en las experiencias de secado de cubos de zanahoria no se observó ninguna influencia de los ultrasonidos hasta que la potencia ultrasónica aplicada rebasó un determinado umbral (20-30 W) (Figura A6.1). A partir de este umbral de potencia mínima, el incremento de la velocidad de secado fue proporcional al nivel de potencia ultrasónica aplicado.



**Figura 4.7.2. Secado de láminas de corteza de limón ( $36 \text{ kg/m}^3$ ) a  $1 \text{ m/s}$  y  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ , a diferentes niveles de potencia (W).**

A partir de los datos experimentales, se ha puesto de manifiesto un comportamiento diferente de la corteza de limón frente a la energía acústica del observado en la zanahoria. Estos resultados coinciden con los mostrados en el Apartado 4.4 en el que se analizó la influencia de la velocidad del aire en el secado acústico de diferentes productos.

La modelización de las cinéticas de secado permitirá, en primer lugar, cuantificar el efecto observado de la potencia ultrasónica en los datos experimentales y, en segundo lugar, comparar de forma más objetiva el comportamiento de la corteza de limón respecto al de la zanahoria.

**4.7.2. Modelos SRE. Influencia de la potencia**

Las cinéticas de secado de zanahoria y corteza de limón anteriormente mostradas se modelizaron, en una primera aproximación al problema, según el modelo difusional sin considerar la resistencia externa a la transferencia de materia. Los modelos utilizados fueron los mismos que se han considerado en otros apartados de este trabajo para estos productos. En el caso de los cubos de zanahoria se utilizó un modelo difusional para una geometría cúbica (Ec. 3.6.10) de lado  $2L = 8.5$  mm. Mientras que en el caso de las láminas de corteza de limón se recurrió a un modelo de lámina infinita (Ec. 3.6.7) de longitud característica igual al espesor de la corteza de limón ( $L = 7$  mm). Como se ha indicado anteriormente, se asume que el flavedo es impermeable a la pérdida de agua durante el secado (Garau et al., 2006) y el movimiento del agua por los espacios intercelulares del albedo transcurre principalmente por dirección radial (Spiegel-Roy y Goldschmidt, 1996; Cháfer, 2000).

Los valores medios de difusividad efectiva identificados (Tabla A6.1) oscilaron, en el caso de la zanahoria, desde  $1.19 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s a 20 y 30 W hasta  $1.68 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s a 90 W. En el caso de la corteza de limón los valores de difusividad estuvieron comprendidos entre  $4.95 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s (20-30 W) y  $11.48 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s (90 W). Los valores de difusividad efectiva identificados (Tabla A6.1) para estos productos en estas experiencias han sido similares a los obtenidos en otros apartados de este trabajo. Por otra parte, se puede apreciar una tendencia al aumento de los valores de difusividad efectiva a medida que se incrementó la potencia ultrasónica aplicada.

Para evaluar si los valores de la difusividad efectiva identificados en las distintas experiencias de secado de zanahoria resultaron significativamente diferentes ( $p < 0.05$ ), se realizó un ANOVA simple. El único factor considerado en este análisis fue el nivel de potencia aplicado (10 niveles: 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 y 90 W). Un ANOVA similar se realizó para la corteza de limón.

Así, el resultado de ambos análisis indicó que el nivel de potencia ultrasónica aplicado aumentó de forma significativa ( $p < 0.05$ ) la difusividad efectiva identificada, tanto en las experiencias de secado de zanahoria como de corteza de limón.

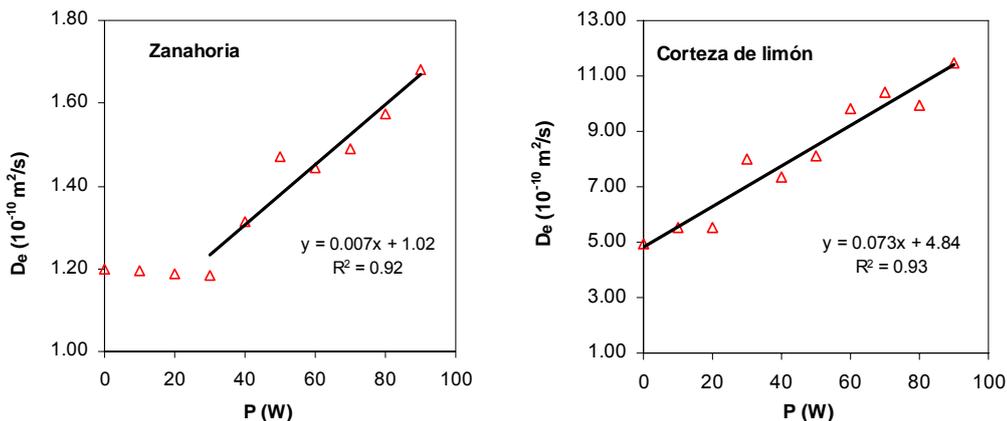


Figura 4.7.3. Influencia de la potencia (W) en la difusividad efectiva, modelo SRE. Experiencias de secado de zanahoria y corteza de limón a 40 °C y 1 m/s.

En las experiencias de secado de cubos de zanahoria, la influencia de los ultrasonidos en la difusividad efectiva no apareció hasta que se superó un determinado umbral de potencia aplicada (Figura 4.7.3). Este umbral se correspondió con una potencia eléctrica aplicada al transductor ultrasónico de 30 W. A partir de este umbral la difusividad efectiva aumentó de forma proporcional con el nivel de potencia aplicado. Esto permite establecer una relación lineal entre ambos parámetros en estas condiciones experimentales (Ec. 4.7.1).

$$D_e (10^{-10} \text{ m}^2 / \text{s}) = 1.02 + 0.007 \times P (\text{W}) \quad (\text{Ec. 4.7.1})$$

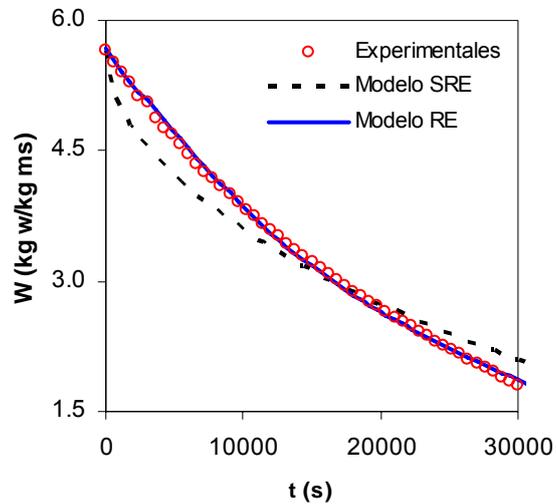
En la introducción ya se mostraron diversos trabajos que han estudiado el efecto del nivel de intensidad ultrasónica en diferentes procesos de transferencia de materia, tales como la deshidratación osmótica de manzana (Cárcel et al., 2007), el salado de carne (Cárcel, 2003) y el secado acústico de surimi (Nakagawa et al., 2006). En estos trabajos también se observó la existencia de

unos niveles mínimos de intensidad ultrasónica para que los parámetros cinéticos se vieran afectados por la energía acústica.

En las experiencias de secado de corteza de limón no se detectó el umbral de potencia ultrasónica mínimo para que la difusividad efectiva se viera afectada por la energía acústica (Figura 4.7.3). A diferencia del comportamiento observado en las experiencias de zanahoria, para el nivel más bajo de potencia ultrasónica aplicado (10 W) ya se encontraron diferencias respecto a las experiencias donde no se aplicaron ultrasonidos (0 W). La proporcionalidad entre difusividad efectiva y potencia ultrasónica (Ec. 4.7.2) se observó en todo el intervalo de potencia evaluado, estableciéndose la relación lineal mostrada en la Ec. 4.7.2.

$$D_e (10^{-10} \text{ m}^2 / \text{s}) = 4.840 + 0.073 \times P (W) \quad (\text{Ec. 4.7.2})$$

Si se comparan las Ec. 4.7.1 y 4.7.2 se observa como la pendiente de la relación lineal fue del orden de 10 veces superior en el caso de la corteza de limón. Este aspecto, junto con el hecho de que no se observó ningún umbral de potencia para que los ultrasonidos influyeran en el proceso de transferencia de materia, sugiere que la corteza de limón es un material más sensible al efecto de los ultrasonidos que la zanahoria. Como ya se indicó en el Apartado 4.4.3 de este trabajo, la porosidad de los materiales puede resultar de gran importancia para determinar su sensibilidad a la energía ultrasónica. En el caso de la corteza de limón se trata de un producto con una porosidad 10 veces mayor que la zanahoria (Boukouvalas et al., 2006). Estos resultados coinciden con los obtenidos por Cárcel (2003) en procesos de transferencia de materia en medio líquido, donde se encontró un efecto mayor en productos de elevada porosidad (manzana) que en productos más fibrosos y de menor porosidad (carne). En definitiva, cuanto mayor sea la porosidad parece ser que el producto es más sensible a la energía acústica.



**Figura 4.7.4. Cinéticas de secado de láminas de corteza de limón, modelos SRE y RE. Experiencia US, 10 W, 1 m/s y 30 °C.**

Por lo tanto, el modelo difusional planteado sin considerar la resistencia externa a la transferencia de materia (SRE) permitió identificar y cuantificar la influencia de la potencia ultrasónica en el secado acústico. Sin embargo este modelo, tal y como era esperado a partir de resultados de apartados anteriores, no ajustó bien los datos experimentales como reflejan los porcentajes de varianza explicados, alrededor del 90 % para la zanahoria y 95 % para el limón (Tabla A6.1). En las Figuras 4.7.4 y A6.2 se observa también la distinta tendencia de los valores experimentales respecto a los calculados con el modelo SRE. En los apartados anteriores de este trabajo se ha mostrado que para las condiciones de velocidad de aire en las que estas experiencias se realizaron, 1 m/s, la influencia de la resistencia externa en el secado no es despreciable frente a la interna.

Sin embargo, los parámetros identificados con el modelo SRE se utilizaron como valores iniciales en la identificación (Apartado 3.6.6) de los parámetros del modelo RE. En definitiva, la modelización previa de las experiencias de secado con el modelo SRE, al proporcionar valores aproximados de  $D_e$  ofrece una mayor

fiabilidad a los parámetros identificados con el modelo RE evitando artificios matemáticos.

#### **4.7.3. Modelo RE. Influencia de la potencia**

Las cinéticas de secado de cubos de zanahoria ( $2L = 8.5$  mm) se modelizaron mediante el modelo difusional aplicado a una geometría cúbica considerando la resistencia externa a la transferencia de materia. Un modelo similar se tuvo en cuenta para las experiencias de secado de láminas de corteza de limón ( $L = 7$  mm), pero en este caso aplicado a una geometría de lámina infinita. Al igual que el resto de modelos RE usados en este trabajo, ambos modelos se resolvieron mediante el método de diferencias finitas a partir de una serie de funciones desarrolladas en Matlab (Anejo 8). Como ya se ha indicado anteriormente, para la identificación de los parámetros del modelo RE ( $k$ ,  $D_e$ ) (Tabla 4.7.1) se tuvieron en cuenta como valores iniciales tanto a los valores de la difusividad efectiva identificados con el modelo SRE (Tabla A6.1) como a los valores del coeficiente de transferencia de materia identificados en anteriores apartados para condiciones experimentales similares.

Los parámetros identificados con el modelo RE (Tabla 4.7.1) permitieron evaluar la influencia del nivel de potencia ultrasónica aplicado tanto en la resistencia interna como externa a la transferencia de materia.

P	Zanahoria				Corteza de limón			
	D <sub>e</sub> (10 <sup>-10</sup> m <sup>2</sup> /s)	k (10 <sup>-4</sup> kg w/m <sup>2</sup> /s)	VAR (%)	EMR (%)	D <sub>e</sub> (10 <sup>-10</sup> m <sup>2</sup> /s)	k (10 <sup>-4</sup> kg w/m <sup>2</sup> /s)	VAR (%)	EMR (%)
0	2.03±0.04 <sub>a</sub>	4.60±0.09 <sub>x</sub>	99.9	1.1	6.39±0.23 <sub>a</sub>	18.50±1.34 <sub>w</sub>	99.8	1.5
10	2.05±0.33 <sub>a</sub>	4.66±0.41 <sub>x</sub>	99.9	1.3	7.54±0.58 <sub>ab</sub>	18.97±0.91 <sub>w</sub>	99.8	1.6
20	2.01±0.36 <sub>a</sub>	4.58±0.15 <sub>x</sub>	99.9	1.2	7.70±0.58 <sub>ab</sub>	20.43±3.25 <sub>w</sub>	99.7	1.9
30	2.24±0.22 <sub>a</sub>	4.40±0.54 <sub>xy</sub>	99.9	1.0	9.14±0.45 <sub>bc</sub>	24.40±7.50 <sub>y</sub>	99.5	1.9
40	2.33±0.17 <sub>ab</sub>	4.98±0.32 <sub>xy</sub>	99.9	1.4	10.33±0.35 <sub>cd</sub>	24.73±0.93 <sub>wx</sub>	99.8	1.7
50	2.48±0.20 <sub>ab</sub>	5.55±0.01 <sub>xy</sub>	99.8	2.0	10.93±0.88 <sub>cd</sub>	29.93±0.42 <sub>xy</sub>	99.8	1.4
60	2.53±0.01 <sub>b</sub>	5.45±0.49 <sub>xy</sub>	99.9	1.2	11.89±0.92 <sub>de</sub>	34.67±2.83 <sub>yz</sub>	99.7	1.7
70	2.63±0.03 <sub>bc</sub>	5.60±0.25 <sub>yz</sub>	99.9	1.0	11.65±0.37 <sub>ef</sub>	39.13±0.78 <sub>y</sub>	99.7	1.7
80	2.57±0.31 <sub>c</sub>	6.03±0.66 <sub>z</sub>	99.9	1.5	13.05±0.67 <sub>f</sub>	37.10±1.77 <sub>yz</sub>	99.8	1.4
90	2.82±0.27 <sub>c</sub>	6.60±0.48 <sub>z</sub>	99.9	1.1	14.25±0.43 <sub>f</sub>	42.70±1.61 <sub>z</sub>	99.8	1.5

Tabla 4.7.1. Modelización de las cinéticas de secado de zanahoria y corteza de limón, modelo RE. Experiencias a 40 °C y 1 m/s. Los subíndices (a, b, c, d, e, f) y (v, w, x, y, z) muestran grupos homogéneos establecidos a partir de los intervalos LSD (p<0.05).

Los porcentajes de varianza explicada obtenidos con el modelo RE fueron siempre superiores al 99 % para ambos productos, y el error medio relativo se mantuvo por debajo del 2 % (Tabla 4.7.1) siendo similar en todas las experiencias. Ambos parámetros estadísticos reflejan que el modelo planteado describió de forma adecuada la evolución de la humedad del producto con el tiempo de secado. En las Figuras 4.7.4 y A.6.2 se observa cómo los valores calculados con el modelo RE presentan una tendencia muy similar a los datos experimentales a diferencia de la mostrada por los calculados con el modelo SRE.

Se realizó un ANOVA simple para evaluar si los valores identificados de la difusividad efectiva con las experiencias de secado de zanahoria fueron significativamente diferentes ( $p < 0.05$ ). El único factor considerado en este análisis fue el nivel de potencia aplicado (10 niveles: 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 y 90 W). Un ANOVA similar se realizó para el caso del coeficiente de transferencia de materia. De forma similar se plantearon dos ANOVAS para evaluar la influencia del nivel de potencia ultrasónica aplicado en los parámetros ( $D_e$  y  $k$ ) identificados en las experiencias de secado de corteza de limón. Los resultados obtenidos (Tabla 4.7.1) se comentan a continuación.

Los parámetros identificados con el modelo RE ( $D_e$  y  $k$ ) estuvieron afectados de forma significativa ( $p < 0.05$ ) por el nivel de potencia ultrasónica aplicado en las experiencias realizadas con ambos productos. De nuevo los resultados reflejan que en el caso de las experiencias de secado acústico de zanahoria, fue necesario superar un umbral de potencia ultrasónica para que los efectos de los ultrasonidos aparecieran. Este comportamiento se encontró tanto en el caso de la difusividad efectiva como en el coeficiente de transferencia de materia (Figura 4.7.5). Por lo tanto, la influencia de los ultrasonidos en la resistencia externa e interna a la transferencia de materia sólo fue apreciable por encima de este umbral de potencia (20-30 W).

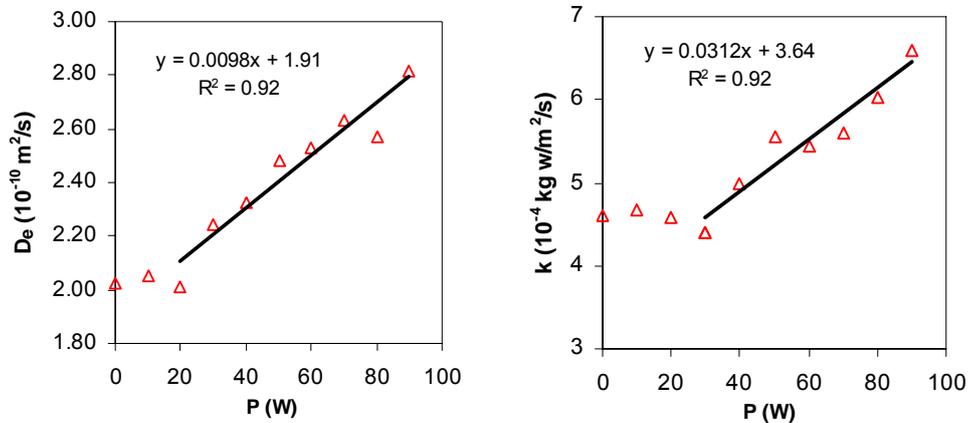


Figura 4.7.5. Influencia de la potencia (W) en  $D_e$  y  $k$ , modelo RE. Experiencias de secado de zanahoria ( $12 \text{ kg/m}^3$ ),  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $1 \text{ m/s}$ .

En las Ec. 4.7.3 y Ec. 4.7.4 se muestran los ajustes lineales entre la difusividad efectiva y el coeficiente de transferencia de materia con la potencia aplicada para las experiencias de secado de cubos de zanahoria. Estas ecuaciones sólo son válidas para potencias iguales o superiores a  $30 \text{ W}$ , ya que por debajo de este nivel de potencia no se encontró ningún efecto de los ultrasonidos.

$$D_e(10^{-10} \text{ m}^2 / \text{s}) = 1.91 + 0.0098 \times P(\text{W}) \quad (\text{Ec. 4.7.3})$$

$$k(10^{-4} \text{ kg w/m}^2 / \text{s}) = 3.64 + 0.0312 \times P(\text{W}) \quad (\text{Ec. 4.7.4})$$

Como ya reflejaron los resultados obtenidos con el modelo SRE, en el caso de la corteza de limón no se identificó un umbral potencia a partir del cual los efectos de los ultrasonidos de potencia en las cinéticas de secado aparecieran. La difusividad efectiva y el coeficiente de transferencia de materia mostraron una relación lineal (Ec. 4.7.5 y Ec. 4.7.6) con la potencia válida para todo el rango de potencias evaluado (Figura 4.7.6), aunque en el caso de  $k$  parece distinguirse un umbral alrededor de  $10 \text{ W}$ . Sin embargo, serían necesarias más experiencias en este rango de potencias para confirmar este aspecto.

$$D_e (10^{-10} \text{ m}^2 / \text{s}) = 6.52 + 0.0836 \times P (\text{W}) \quad (\text{Ec. 4.7.5})$$

$$k (10^{-4} \text{ kg w} / \text{m}^2 / \text{s}) = 14.87 + 0.3072 \times P (\text{W}) \quad (\text{Ec. 4.7.6})$$

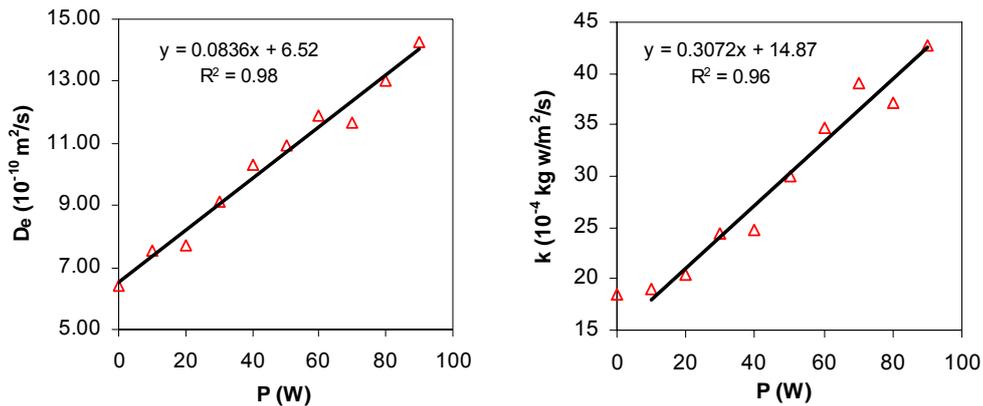


Figura 4.7.6. Influencia de la potencia (W) en  $D_e$  y  $k$ , modelo RE. Experiencias de secado de corteza de limón ( $36 \text{ kg/m}^3$ ),  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $1 \text{ m/s}$ .

Las pendientes de las ecuaciones que relacionan tanto la difusividad como el coeficiente de transferencia de materia con la potencia ultrasónica aplicada son del orden de 10 veces mayor en el caso de las experiencias de secado de láminas de corteza de limón que de cubos de zanahoria. Este hecho, junto con la ausencia de un umbral mínimo de potencia para que aparezcan los efectos de los ultrasonidos, vuelve a poner de manifiesto que la corteza de limón es un material más sensible a la energía acústica que la zanahoria. Por lo tanto, en las aplicaciones del secado acústico, una de las variables importantes que se debe considerar es la materia prima, ya que el efecto de los ultrasonidos es diferente según el material tratado.

El modelo RE no sólo permitió modelizar de forma adecuada las cinéticas de secado de los cubos de zanahoria y láminas de corteza de limón, si no que además puso de manifiesto la dependencia de la difusividad efectiva y el coeficiente de transferencia de materia de la potencia aplicada.

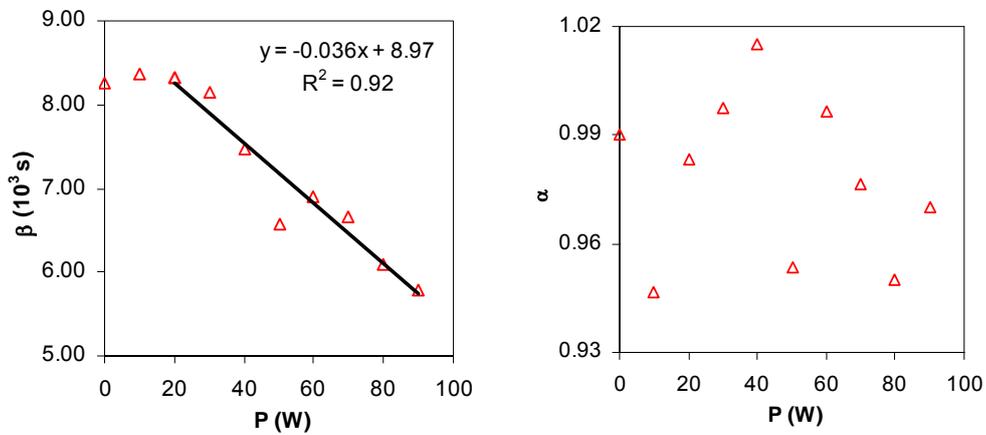
#### 4.7.4. Modelo de Weibull. Influencia de la potencia

Con el objetivo de confirmar los resultados alcanzados con los modelos difusionales se utilizó el modelo de Weibull para analizar las cinéticas de secado de cubos de zanahoria y láminas de corteza de limón obtenidas a diferentes potencias aplicadas.

Al igual que ha ocurrido en los diferentes tipos de experiencias realizadas en este trabajo, el modelo de Weibull ajustó de forma adecuada las experiencias de secado tanto de la zanahoria como de la corteza de limón (Tabla A6.2). Los porcentajes de varianza explicados fueron superiores en todos los casos al 99 %.

El parámetro cinético del modelo de Weibull ( $\beta$ ) disminuyó a medida que el nivel de potencia ultrasónica aplicado fue mayor debido a su relación inversa con la velocidad de secado (Tabla A6.2). En las experiencias de secado de zanahoria y corteza de limón, la influencia de la potencia en este parámetro fue estadísticamente significativa ( $p < 0.05$ ). Sin embargo, no se observó ningún tipo de influencia de esta variable en el parámetro  $\alpha$  (Figuras 4.7.7 y 4.7.8).

Al igual que se pudo observar en los modelos difusionales, los efectos de los ultrasonidos en el parámetro cinético  $\beta$  identificado en las experiencias de secado acústico de zanahoria no aparecen hasta un determinado umbral de potencia ultrasónica aplicado (Figura 4.7.7). A partir de este umbral de potencia, se encontró una relación lineal entre el parámetro cinético y el nivel de potencia ultrasónica (Ec. 4.7.7).



**Figura 4.7.7. Influencia de la potencia ultrasónica en los parámetros del modelo de Weibull ( $\alpha$  y  $\beta$ ). Experiencias de secado de zanahoria ( $12 \text{ kg/m}^3$ ),  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $1 \text{ m/s}$ .**

Como ya se ha indicado anteriormente, los resultados obtenidos en las experiencias de secado de zanahoria contrastan con los obtenidos en el caso de la corteza de limón, donde los efectos de los ultrasonidos sobre el parámetro  $\beta$  aparecen en todo el rango de potencia ultrasónica evaluado (Figura 4.7.8). En la Ec. 4.7.7 y en la Ec. 4.7.8 se muestran las relaciones lineales identificadas en el caso de la zanahoria y la corteza de limón, respectivamente. Si se comparan las pendientes de estas ecuaciones, se puede observar como la pendiente en el caso de las experiencias de corteza de limón es mucho mayor que en el caso de la zanahoria. A partir del modelo de Weibull también se pone de manifiesto la mayor sensibilidad de la corteza de limón ante la energía acústica que la zanahoria.

$$\beta(10^3 \text{ s}) = 8.97 - 0.036 \times P(\text{W}) \quad (\text{Ec. 4.7.7})$$

$$\beta(10^3 \text{ s}) = 26.77 - 0.181 \times P(\text{W}) \quad (\text{Ec. 4.7.8})$$

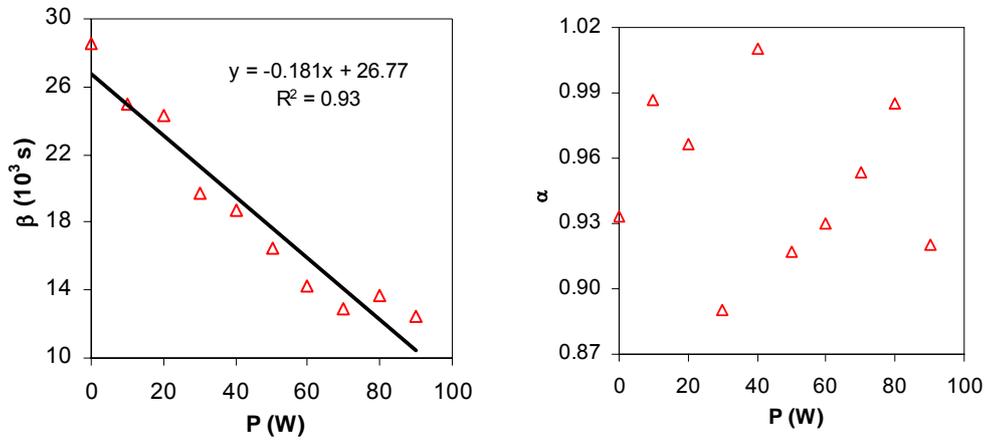


Figura 4.7.8. Influencia de la potencia ultrasónica en los parámetros del modelo de Weibull ( $\alpha$  y  $\beta$ ). Experiencias de secado de corteza de limón ( $36 \text{ kg/m}^3$ ),  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $1 \text{ m/s}$ .

#### **4.8. LIOFILIZACIÓN A PRESIÓN ATMOSFÉRICA DE BACALAO**

En los anteriores apartados, se ha profundizado en el estudio de la aplicación de los ultrasonidos de potencia en el secado convectivo de alimentos. El trabajo realizado ha permitido mostrar la influencia que tienen diversas variables del proceso en los efectos de la aplicación ultrasónica sobre el secado. Una de las variables que mayor influencia ha mostrado es la temperatura, ya que los ultrasonidos de potencia no afectan a la velocidad de secado cuando se aplican a elevadas temperaturas. Este hecho junto con la característica que tienen los ultrasonidos de no producir aumentos significativos de la temperatura del medio, abren un campo de aplicación bastante amplio en procesos que se realizan a baja temperatura.

Como ya se ha indicado en la introducción de este trabajo, la liofilización a presión atmosférica presenta una velocidad de secado muy baja al utilizar temperaturas por debajo del punto de congelación de los alimentos. La aplicación de fuentes de energía adicionales como son las microondas o la radiación infrarroja no se consideran muy viables debido al aumento de temperatura que producen en el producto. Estos aspectos justifican los estudios acerca de la aplicación de la tecnología ultrasónica en este proceso. Además, al tratarse la liofilización a presión atmosférica de una tecnología con mayores costes que el secado con aire caliente se utiliza en productos de mayor valor añadido.

Antes de abordar la aplicación de ultrasonidos de potencia en la liofilización a presión atmosférica, se consideró oportuno evaluar dicha tecnología determinando su influencia en diferentes parámetros de calidad. Como materia prima se escogió un producto en el que el secado constituyera una parte muy importante de su procesado, como es el caso del bacalao. El bacalao seco es considerado un producto de elevado valor añadido y muy apreciado en el mercado europeo y latinoamericano, de forma destacada en España, Portugal y Brasil. A continuación se describen los resultados obtenidos del estudio de la operación de

liofilización a presión atmosférica de bacalao como paso previo a la aplicación de ultrasonidos en dicho proceso.

#### **4.8.1. Influencia de la temperatura de secado en la cinética del proceso**

##### **4.8.1.1. Cinéticas de secado de bacalao**

Las experiencias de secado de bacalao se realizaron con producto granulado, con una geometría variable, y también con cubos de bacalao de geometría fija (lado 5 mm). En ambos productos se realizaron experiencias de secado a temperatura por debajo (-5 y -10 °C) y por encima (0, 15 y 30 °C) del punto de congelación del producto. Cabe aclarar que se consideraron únicamente como experiencias de liofilización a presión atmosférica las experiencias realizadas a -5 y -10 °C.

También se realizaron experiencias combinando temperaturas. Durante la primera parte de las experiencias se aplicaron temperaturas por debajo del punto de congelación (-5 y -10 °C) y, a partir de contenidos de humedad inferiores a 0.4 kg w/kg producto, una temperatura elevada (30 °C). Todas las experiencias se realizaron en condiciones de lecho móvil (fluidizado) pero sin control de la velocidad del aire, la cuál se mantuvo entre 3 y 5 m/s en función del contenido de humedad del producto.

El bacalao presentó una humedad inicial de  $4.52 \pm 0.31$  kg w/kg ms. El periodo de velocidad de secado constante no se observó, por lo que la humedad crítica coincidió con la humedad inicial.

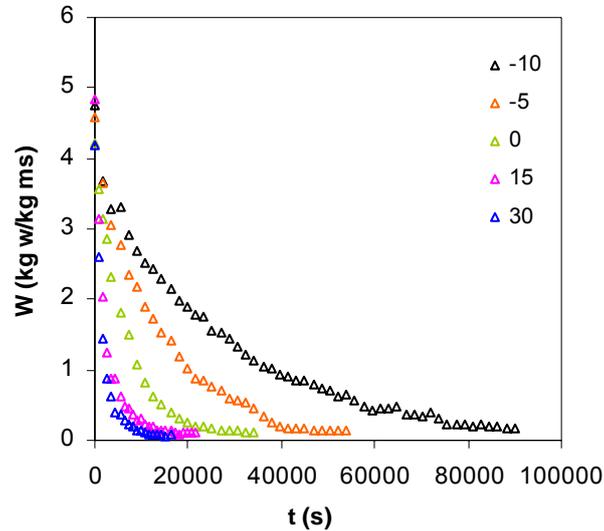


Figura 4.8.1. Secado de cubos bacalao (5 mm de lado) a diferentes temperaturas (°C).

En la Figura 4.8.1 se muestran las cinéticas de secado realizadas a diferentes temperaturas de muestras de bacalao cortadas en cubos, y en la Figura A7.1 para las muestras granuladas. En ambas figuras se puede observar como la temperatura de secado influyó en la cinética incrementando la velocidad de secado. Resultados similares han sido presentados en bibliografía para diferentes productos secados mediante liofilización a presión atmosférica (Mittal et al., 1999; García-Pascual, 2004; García-Pascual et al., 2004; Alves-Filho et al., 2006). Las cinéticas obtenidas con producto granulado y con cubos, a pesar de que se realizaron en las mismas condiciones experimentales, no son comparables al obtenerse con productos de geometría muy diferente,

En la Figura 4.8.2 se muestra la evolución del contenido de humedad de cubos de bacalao en experiencias donde se combinaron temperaturas de secado. Se puede observar que la aplicación de temperaturas de secado más elevadas que las utilizadas en condiciones de liofilización produjo un aumento rápido y significativo de la velocidad de secado.

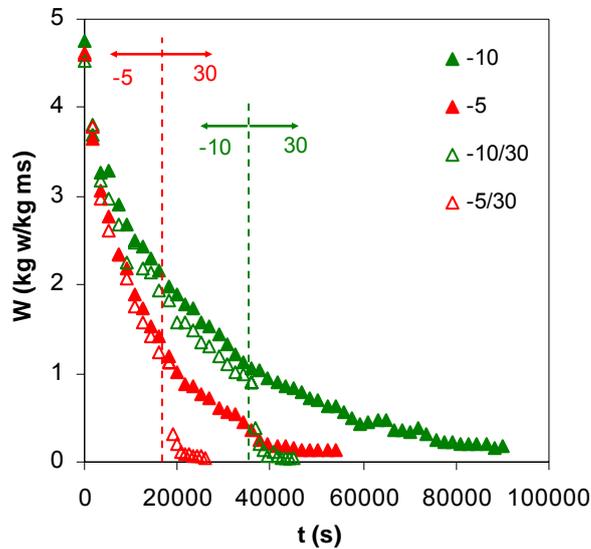


Figura 4.8.2. Cinéticas de secado de cubos bacalao (5 mm de lado) combinando diferentes temperaturas ( $^{\circ}\text{C}$ ).

#### 4.8.1.2. Modelización del secado de bacalao

Las cinéticas de secado de los cubos de bacalao para la geometría cúbica fueron modelizadas utilizando el modelo difusional SRE (Ec. 3.6.10) y el modelo empírico de Weibull (Ec. 1.1.14). Las experiencias realizadas con la muestra granulada no se modelizaron debido a la geometría muy irregular y diversa de los gránulos obtenidos (Figura 3.5.2).

La humedad de equilibrio se obtuvo a partir de medidas experimentales de actividad de agua y contenido de humedad del producto durante las experiencias de secado. En la Figura A7.2 se muestra la relación entre la actividad de agua y el contenido de humedad para las diferentes experiencias realizadas de secado de cubos de bacalao. No se observó una influencia significativa ( $p < 0.05$ ) de las condiciones de secado en la isoterma de bacalao (Figura A7.2). El conjunto de datos experimentales fue modelizado con el modelo de GAB (Ec. 1.1.3), los parámetros identificados fueron  $W_m = 0.051$  kg w/kg producto,  $C = 1.262$  y  $K = 0.922$ . El modelo de GAB fue muy útil para describir los datos experimentales,

como muestra el alto porcentaje de varianza explicada obtenido (VAR = 99.3 %). Sablani et al. (2001) obtuvieron un valor similar del contenido de humedad de la monocapa para las isotermas de sorción de sardina liofilizada determinadas a 25, 40 y 50 °C.

En la Tabla 4.8.1 se muestran los resultados de la modelización de las cinéticas de secado con el modelo difusional SRE y el modelo de Weibull. Los parámetros cinéticos de ambos modelos reflejan la influencia de la temperatura en las cinéticas de secado. La difusividad efectiva aumentó a medida que la temperatura de secado utilizada fue más alta, mientras que el parámetro  $\beta$  del modelo de Weibull disminuyó debido a su relación inversa con la velocidad de secado. Mittal et al. (1999) recopilaron valores de difusividad efectiva de pescado secado a -10 y -5 °C de  $0.52 \times 10^{-11}$  y  $1.04 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s respectivamente.

T (°C)	Modelo Difusional		Modelo de Weibull		
	D <sub>e</sub> (10 <sup>-11</sup> m <sup>2</sup> /s)	VAR (%)	$\alpha$	$\beta$ (10 <sup>3</sup> s)	VAR (%)
-10	2.3	97.5	0.77	19.0	98.7
-5	4.0	95.9	0.88	11.4	99.3
0	7.5	93.8	1.00	6.2	99.9
15	21.8	98.2	0.82	2.0	99.5
30	28.1	97.5	0.94	1.7	99.7

Tabla 4.8.1. Modelización de las cinéticas de secado de cubos de bacalao, modelos SRE y Weibull.

El modelo de Weibull ajustó mejor los datos experimentales que el modelo difusional SRE (Tabla 4.8.1). Los porcentajes de varianza explicados obtenidos con el modelo de Weibull fueron cercanos al 99 % en todas las experiencias, mientras que en modelo difusional éstos variaron dentro del rango comprendido entre 93.8 y 98.2 %. Esta variación pudo deberse a la propia variabilidad de los datos experimentales obtenidos (Figura 4.8.1). Por otro lado, los bajos porcentajes de varianza también se podrían explicar, por ejemplo, por no tener en cuenta el encogimiento de las muestras. Para obtener unos resultados más fiables sería

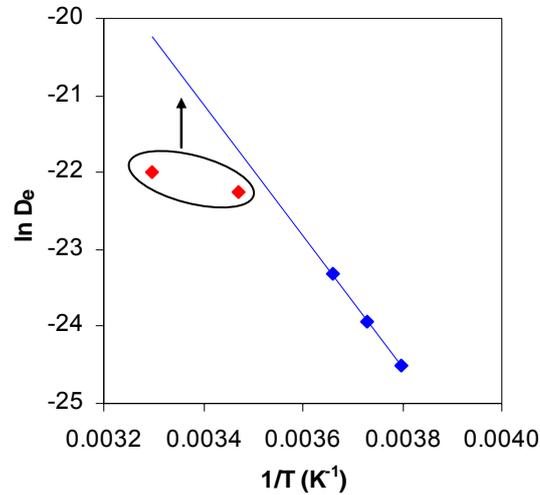
necesario realizar un trabajo experimental más intenso y plantear nuevos modelos difusionales.

#### **4.8.1.3. Estimación de la energía de activación. Secado de bacalao**

La influencia de la temperatura en los parámetros cinéticos de los modelos se puede describir a partir de la ley de Arrhenius. En la Figura 4.8.3 aparece la representación del logaritmo neperiano de la difusividad efectiva frente a la inversa de la temperatura para las experiencias de secado de cubos de bacalao.

En la Figura 4.8.3 se observa cómo los valores de difusividad efectiva identificados en las experiencias realizadas a temperaturas de no congelación (15 y 30 °C) no siguen la relación lineal marcada por los valores identificados a temperaturas de congelación (-5 y -10 °C). El mismo comportamiento puede observarse con la inversa del parámetro  $\beta$  del modelo de Weibull (Figura A7.3). Por lo tanto, la ecuación de Arrhenius no sirvió para describir la influencia de la temperatura en la cinética del proceso en todo el rango de temperaturas experimentales abordado en este trabajo debido a la congelación del agua.

En condiciones de liofilización (-10 y -5 °C) el proceso de eliminación del agua de la partícula tiene lugar por sublimación al encontrarse el agua en estado sólido. Por el contrario, en el caso de las experiencias realizadas a altas temperaturas (15 y 30 °C) la pérdida de agua es por evaporación ya que el agua está en estado líquido. Esta diferencia se refleja en los datos experimentales y hace que éstos no se puedan analizar conjuntamente. La experiencia realizada a 0 °C se puede considerar como un proceso intermedio entre la liofilización y el secado por aire caliente, ya que en este caso pueden darse de forma simultánea tanto la evaporación como la sublimación del agua presente en las muestras si existe agua sin sólidos disueltos.



**Figura 4.8.3. Influencia de la temperatura en la difusividad efectiva, modelo SRE. Secado de bacalao.**

Por esta razón se pensó en obtener dos valores de energía de activación diferentes. Aunque el número de puntos experimentales no permite obtener resultados concluyentes sí que se puede obtener una primera aproximación. Por un lado, se determinó la energía de activación para las experiencias realizadas en condiciones de liofilización (-10, -5 y 0 °C), y por otro lado, la debida a las experiencias realizadas a altas temperaturas (0, 15 y 30 °C) (Tabla 4.8.2). Los valores de energía de activación obtenidos con ambos modelos (difusional y Weibull) son muy similares. Por otra parte, se puede observar que la energía de activación de las experiencias de liofilización fue muy superior a la obtenida para las experiencias realizadas a alta temperatura. Obviamente, la energía necesaria para la deshidratación es mayor cuando se utilizan temperaturas de secado por debajo del punto de congelación del producto.

El calor latente de sublimación para el agua pura a -10 °C (51.1 kJ/mol) es inferior al valor de la energía de activación identificado para las experiencias de liofilización. En la bibliografía se encontraron valores similares de energía de activación para experiencias de liofilización de otros productos: pescado 79.3

kJ/mol (Mittal et al., 1999) y guisantes 108 kJ/mol (García-Pascual, 2004). En cuanto a las experiencias realizadas a altas temperaturas, los valores obtenidos resultaron similares a los obtenidos en otros procesos de secado por aire caliente (Tabla A2.1).

	<b>Modelo Difusional</b>	<b>Modelo de Weibull</b>
<b>Liofilización</b>	71.1	67.0
<b>Altas temperaturas</b>	30.7	29.4

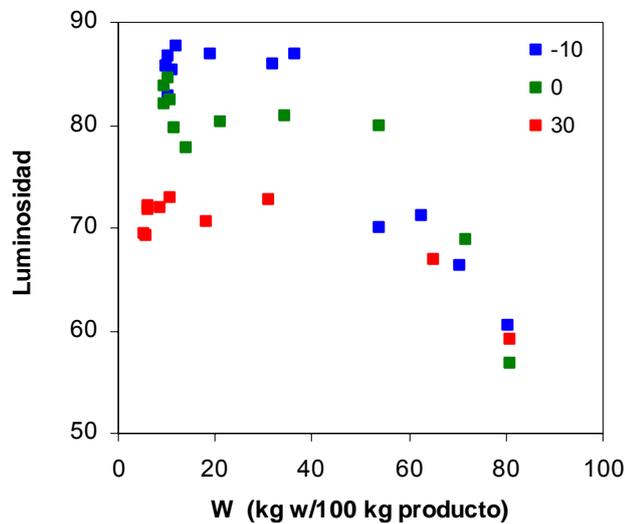
**Tabla 4.8.2. Valores de energía de activación (kJ/mol) identificados en las experiencias de secado de bacalao.**

#### **4.8.2. Influencia de la temperatura de secado en los parámetros de calidad**

En este apartado se estudió la influencia que tiene la temperatura de secado en diferentes parámetros de calidad del bacalao, de manera que se pueda evaluar la influencia de la liofilización en la calidad del producto en comparación con el obtenido por secado con aire caliente.

##### **4.8.2.1. Color**

El color de las muestras fue medido a lo largo de las experiencias de secado a partir de los parámetros del espacio de color uniforme CIE  $L^*a^*b^*$ . La luminosidad ( $L^*$ ) fue el único de los parámetros que varió durante las experiencias de secado (Figura 4.8.4). La luminosidad aumentó durante las experiencias de secado hasta contenidos de humedad cercanos a 40 kg w/100 kg producto, a partir del cual permaneció constante.



**Figura 4.8.4. Evolución de la luminosidad de las muestras de bacalao durante las experiencias de secado realizadas a diferentes temperaturas (°C).**

La temperatura de secado también influyó en la luminosidad de las muestras (Figura 4.8.4). En la Figura 4.8.5 se muestra la luminosidad media de las muestras secadas a diferentes temperaturas para contenidos de humedad superiores a 40 kg w/100 kg producto. Las muestras liofilizadas presentaron una luminosidad muy superior a las muestras secadas a alta temperatura (15 y 30 °C). Las muestras secadas a 0 °C presentaron una luminosidad intermedia. La utilización de aire caliente (30 °C) tras una primera etapa realizada en condiciones de liofilización (experiencias -10/30 y -5/30) no afectó a la luminosidad de las muestras. Este hecho se vio favorecido porque la aplicación de altas temperaturas se hizo a contenidos de humedad cercanos a 40 kg w/100 kg producto, a partir del cual la luminosidad permaneció constante.

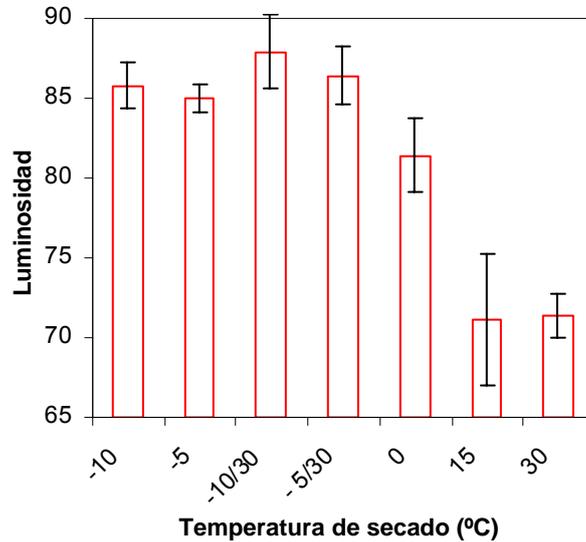


Figura 4.8.5. Luminosidad media y desviaciones estándar para las muestras de bacalao granulado secadas a diferentes temperaturas (°C) para contenidos de humedad superiores a 40 kg w/100 kg producto.



A. Muestras secadas a 30 °C.



B. Muestras liofilizadas

Figura 4.8.6. Diferencias entre el color de muestras liofilizadas y secadas por aire caliente.

El color del bacalao seco es uno de los atributos de calidad más importantes de este producto. El color blanco puede hacer al producto más apetecible para el consumidor (Figura 4.8.6). Por lo tanto, la liofilización a presión atmosférica

permite obtener un producto de mayor calidad visual que el obtenido con las experiencias de secado por aire caliente.

#### 4.8.2.2. Encogimiento

El encogimiento de las muestras durante el secado aparece como consecuencia del calentamiento y la pérdida de agua, que producen el colapso de la estructura del material (Mayor y Sereno, 2004). Los cambios de forma y pérdida de volumen son apreciados por el consumidor como parámetros indicativos de la degradación del producto y, por tanto, se relacionan con una pérdida de calidad. Es por esto que se consideró necesario evaluar la influencia de la liofilización atmosférica en este parámetro.

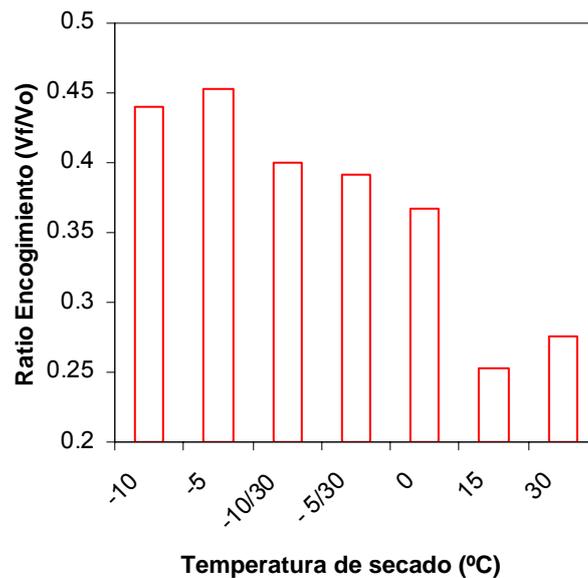


Figura 4.8.7. Ratio de encogimiento (Vf/Vo) para los cubos de bacalao secados a diferentes temperaturas (°C).

En la Figura 4.8.7 se muestra la influencia de la temperatura de secado en el ratio de encogimiento (Volumen final/Volumen inicial) de las muestras de bacalao cortadas en cubos. Las muestras liofilizadas presentaron un mayor ratio

de encogimiento que las secadas a alta temperatura (15 y 30 °C), lo que indica una menor reducción del volumen durante el secado. Las experiencias realizadas a 0 °C mostraron un ratio de encogimiento intermedio. De la misma manera que ocurrió cuando se abordó el estudio del color de las muestras, las experiencias realizadas a temperatura combinada (-10/30 y -5/30) presentaron un ratio de encogimiento similar al obtenido en las experiencias de liofilización.

La liofilización a presión atmosférica produjo un menor colapso de la estructura del bacalao durante la deshidratación en comparación con el secado por aire caliente. Así, se obtiene un producto de mayor calidad que el obtenido mediante secado a temperaturas elevadas y caracterizado por sufrir un menor encogimiento.

#### **4.8.2.3. Densidad aparente**

En la Figura 4.8.8 se muestra la influencia de las condiciones de secado de bacalao en la densidad final del lecho de partículas. La influencia de la temperatura en el encogimiento se reflejó en este parámetro, ya que un mayor encogimiento se traduce en una mayor densidad del lecho. Las muestras secadas por aire caliente presentaron una densidad aparente que en algunos casos fue un 300 % superior a la mostrada por las muestras liofilizadas (Figura 4.8.8).

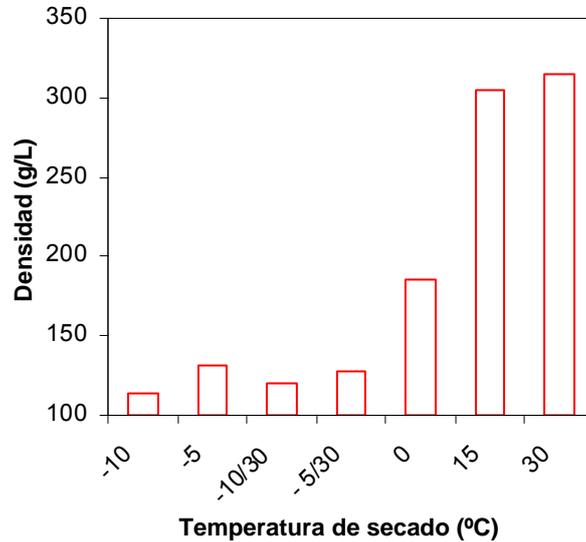
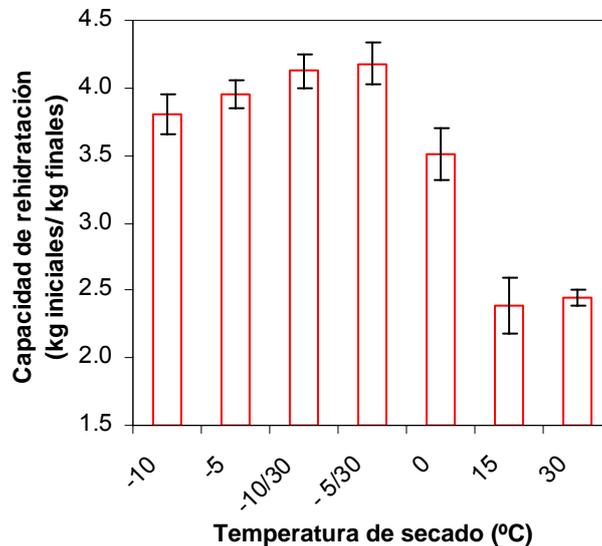


Figura 4.8.8. Densidad aparente del lecho de muestras de bacalao granulado secadas a diferentes temperaturas (°C).

#### 4.8.2.4. Capacidad de rehidratación

En la Figura 4.8.9 se muestra la capacidad de rehidratación de las muestras de bacalao secadas a diferentes temperaturas. Las muestras liofilizadas presentaron una capacidad de rehidratación muy superior que las secadas por aire caliente. La capacidad de rehidratación es otro parámetro que se ve afectado por el encogimiento de las muestras. Cuanto mayor es el colapso de la estructura celular durante el secado, menor es la capacidad posterior de rehidratación (Mayor y Sereno, 2004) tal y como se puede observar en la Figura 4.8.9.



**Figura 4.8.9. Capacidad de rehidratación de las muestras de bacalao granulado secadas a diferentes temperaturas (°C).**

A partir de las experiencias de secado de bacalao realizadas en este trabajo se ha podido concluir que la liofilización permite obtener un bacalao seco de mayor calidad que el obtenido con aire caliente. Sin embargo, la aplicación de esta tecnología puede verse limitada por la baja velocidad de secado como consecuencia de las bajas temperaturas que utiliza.

En el Apartado 4.5 de este trabajo se identificó un incremento de la difusividad efectiva del 55 % en las experiencias de secado de zanahoria realizadas a 30 °C debido a la aplicación de ultrasonidos de potencia (Tabla 4.5.3). Considerando un incremento de la difusividad efectiva similar para las experiencias de liofilización a presión atmosférica de bacalao realizadas a -10 °C, se puede estimar que el tiempo de secado necesario para alcanzar un contenido de humedad de 0.15 kg w/kg producto se reduciría en aproximadamente 45000 s (12.5 horas) debido a la aplicación de ultrasonidos. Por lo tanto, se considera que una adecuada alternativa para incrementar la velocidad de secado de esta

tecnología podría ser la aplicación de ultrasonidos de potencia. Evidentemente resultaría necesario desarrollar un sistema ultrasónico adaptado a los secaderos con bomba de calor para comprobar esta conclusión. Dado que se ha comprobado que al disminuir la temperatura aumenta el efecto de los ultrasonidos sobre la difusividad efectiva cabe pensar que el resultado anterior responde a un cálculo conservativo.

## **5. CONCLUSIONES**

Del estudio realizado se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- A partir de la revisión bibliográfica sobre el secado convectivo de alimentos se identificaron una serie de limitaciones en este proceso que se podrían suplir con la introducción de nuevas tecnologías como los ultrasonidos de potencia. La utilización de ultrasonidos en el secado de productos sensibles al calor presenta un elevado interés, ya que los ultrasonidos no producen un aumento significativo de la temperatura del producto.
- Los trabajos sobre aplicación de ultrasonidos de potencia en procesos agroalimentarios permitieron identificar las posibles variables que podrían afectar al secado convectivo asistido por ultrasonidos. Entre otras, se consideró necesario explorar el efecto de la velocidad y la temperatura del aire de secado, la intensidad acústica y la influencia del propio material.

### **Sistema de aplicación de ultrasonidos de potencia**

- Un nuevo sistema de aplicación de ultrasonidos de potencia fue diseñado basándose en la premisa de conseguir que las propias paredes de la cámara de secado fueran las encargadas de radiar la energía ultrasónica. Un secadero convectivo a escala de laboratorio fue modificado para su instalación.
- Los parámetros de la señal eléctrica con la que se excitó al transductor ultrasónico durante las experiencias de secado fueron similares a los obtenidos en la caracterización previa del equipo, lo que muestra un correcto funcionamiento del sistema de aplicación de ultrasonidos como consecuencia de su adecuada instalación en el secadero convectivo.

**Isotermas de sorción de corteza de limón**

- La temperatura influyó en las isotermas de sorción de corteza de limón dentro del rango experimental estudiado 20-50 °C.
- El modelo de GAB se consideró como el más adecuado para la modelización de las isotermas de sorción de corteza de limón incluyendo el efecto de la temperatura.
- Los métodos de resolución diferencial e integral de la ecuación de Clausius-Clapeyron proporcionaron estimaciones similares del calor isostérico de sorción.

**Secado en lecho fluidizado**

- Las cinéticas de secado en lecho fluidizado de zanahoria y albaricoque se vieron afectadas por la temperatura dentro del rango experimental comprendido entre 35-60 °C.
- La aplicación de ultrasonidos de potencia (75 W, 21.7 kHz) no influyó en las cinéticas de secado realizadas en condiciones de lecho fluidizado (10-14 m/s).

**Influencia de la velocidad del aire y el tipo de material**

- La presión sonora media medida en el interior de la cámara de secado disminuyó con el aumento de la velocidad del aire. Dicho descenso fue más acusado a partir de una velocidad del aire de 2 m/s y permaneció constante a partir de 8 m/s. Además de la intensidad acústica, el flujo de aire también perturbó a la propia estructura del campo acústico.
- La velocidad del aire afectó al secado de diferentes productos agroalimentarios (zanahoria, corteza de limón y caqui). La influencia fue significativa ( $p < 0.05$ ) únicamente por debajo de 5 m/s para las experiencias donde no se aplicaron ultrasonidos de potencia (SUS). Dicho umbral se pudo establecer a partir de los valores de difusividad

---

## CONCLUSIONES

efectiva identificados con un modelo difusivo sin considerar la resistencia externa (SRE).

- La aplicación de ultrasonidos de potencia (75 W, 21.7 kHz) aumentó la velocidad de secado de las muestras de zanahoria y caqui únicamente a bajas velocidades de aire (< 6 m/s). En el caso de la corteza de limón, la influencia de los ultrasonidos fue apreciable en todo el rango de velocidades de aire (0.5-9 m/s).
- El comportamiento diferente de la zanahoria y el caqui ante la energía acústica respecto del observado con la corteza de limón puede explicarse a partir de la diferente estructura de estos productos. Según la bibliografía, la corteza de limón presenta una porosidad 10 veces superior a la zanahoria.
- Los productos de mayor porosidad pueden ser más sensibles a los ciclos de compresión-descompresión producidos por la onda acústica (“efecto esponja”). Además, los efectos de los ultrasonidos en las interfases gas-sólido de los productos porosos pueden ser más intensos al poseer una red interna de espacios intercelulares mayor.
- Los bajos porcentajes de varianza explicada obtenidos con el modelo SRE a velocidades de aire inferiores a 6 m/s indicaron que este modelo no fue adecuado para la modelización de las cinéticas de secado en condiciones de bajas velocidades de aire. Por lo tanto, se desarrollaron modelos difusionales para las diferentes geometrías considerando el efecto de la resistencia externa (RE) en la transferencia de materia para estas condiciones de velocidad de aire. Estos modelos describieron de forma adecuada las cinéticas de secado de los diferentes productos, proporcionando porcentajes de varianza explicada superiores al 99 % y errores medios relativos inferiores al 10 % en todos los casos.
- Los valores de la difusividad efectiva ( $D_e$ ) y del coeficiente de transferencia de materia ( $k$ ) identificados con el modelo RE en las

experiencias de secado de caqui donde se aplicaron ultrasonidos de potencia (US, 75 W, 21.7 kHz) fueron estadísticamente superiores ( $p < 0.05$ ) respecto a los identificados en las experiencias donde no se aplicaron ultrasonidos (SUS). Así, la aplicación de ultrasonidos afectó tanto a la resistencia externa como a la interna a la transferencia de materia a velocidades de aire bajas.

- La ausencia de efectos de los ultrasonidos en las experiencias de secado de productos de baja porosidad (zanahoria y caqui) realizadas a altas velocidades de aire podría explicarse porque no se alcanza el umbral de intensidad necesario para afectar a la resistencia interna a la transferencia de materia. Este hecho pudo deberse a la disminución de la intensidad del campo acústico producida por el aumento del flujo de aire.

#### **Influencia de la temperatura**

- La aplicación de ultrasonidos de potencia (75 W, 21.7 kHz) incrementó de forma significativa ( $p < 0.05$ ) los valores de la difusividad efectiva y del coeficiente de transferencia de materia en las experiencias de secado de cubos de zanahoria (8.5 mm de lado) realizadas a 1 m/s y temperaturas comprendidas entre 30-50 °C. La influencia dejó de ser significativa para la temperatura de 60 °C y totalmente despreciable a 70 °C.
- La ecuación de Arrhenius no describió adecuadamente la influencia de la temperatura en los valores de difusividad efectiva identificados en las experiencias US debido a la disminución de los efectos debidos a la aplicación de ultrasonidos a temperaturas por encima de 50 °C.

**Influencia de la densidad de carga**

- La densidad de carga influyó de forma significativa en las experiencias de secado SUS y US (75 W, 21.7 kHz) de cubos de zanahoria dentro del rango experimental 12-120 kg/m<sup>3</sup>.
- La densidad de carga no influyó en la difusividad efectiva afectando únicamente de forma significativa ( $p < 0.05$ ) al coeficiente de transferencia materia. El aumento de la carga másica en las bandejas de secado pudo dificultar el flujo de aire alrededor de las partículas, creando algunos caminos preferenciales, incrementando así la resistencia externa y por tanto, disminuyendo el coeficiente de transferencia de materia.
- La aplicación de ultrasonidos de potencia aumentó de forma significativa ( $p < 0.05$ ) la difusividad efectiva y el coeficiente de transferencia de materia en todo el rango de densidades de carga evaluado. Aunque, las diferencias dejaron de ser estadísticamente significativas en las condiciones ensayadas para cargas superiores a 90 kg/m<sup>3</sup>. Esto pudo ser consecuencia de la disminución de la cantidad de energía ultrasónica que le llega a cada partícula por el aumento de la masa presente en la cámara de secado.

**Influencia de la potencia aplicada**

- La potencia ultrasónica aplicada influyó en la cinética de las experiencias de secado de cubos de zanahoria y láminas de corteza de limón en el intervalo comprendido entre 0-90 W, aumentando la velocidad de secado a medida que se incrementó la potencia aplicada.
- Los efectos asociados a la aplicación de ultrasonidos aparecieron a partir de un umbral de potencia aplicada situado en torno a 30 W para las experiencias de secado de zanahoria. A partir de este umbral, tanto la difusividad efectiva como el coeficiente de transferencia de materia aumentaron de forma proporcional con la potencia.

---

## CONCLUSIONES

- En el secado de la corteza de limón, se observó también la proporcionalidad entre difusividad efectiva o coeficiente de transferencia de materia y la potencia aplicada. Sin embargo, dicha proporcionalidad fue, en este caso, válida en todo el rango de potencia evaluado (10-90 W).
- Las pendientes de las relaciones lineales entre  $D_e$  o  $k$  y la potencia aplicada presentaron una pendiente diez veces superior en las experiencias de secado de corteza de limón respecto de las obtenidas para las experiencias de zanahoria. Por lo tanto, estos resultados mostraron la mayor efectividad de la aplicación de ultrasonidos en los materiales porosos.

### Modelo empírico de Weibull

- El modelo empírico de Weibull permitió corroborar los resultados derivados del análisis del proceso de secado utilizando modelos difusionales. Los porcentajes de varianza explicada en las cinéticas de secado fueron superiores al 99 % en todos los casos.
- La información que proporcionó el parámetro  $\beta$  de Weibull acerca de la influencia de los ultrasonidos de potencia en la cinética de secado fue muy similar a la obtenida a partir de la difusividad efectiva identificada con los modelos difusionales.

### Liofilización a presión atmosférica de bacalao

- La liofilización a presión atmosférica de bacalao permitió obtener un producto con unos índices de calidad superiores al obtenido en las experiencias de secado por aire caliente. El bacalao liofilizado estuvo caracterizado por su menor encogimiento, mayor capacidad de rehidratación y luminosidad respecto del secado por aire caliente.

---

## CONCLUSIONES

- La principal desventaja de esta tecnología es la baja velocidad de secado como consecuencia de la utilización de temperaturas por debajo del punto de congelación de las muestras.
- La combinación de temperaturas por debajo y por encima del punto de congelación del producto (-10/30 °C ó -5/30 °C) aumentó la velocidad de secado respecto a las experiencias de liofilización sin influir de forma apreciable en los parámetros de calidad del producto.
- La aplicación de ultrasonidos de potencia para aumentar la velocidad de secado en la liofilización a presión atmosférica de productos de alta calidad, como el bacalao, debe considerarse como una alternativa muy interesante. Realizando un cálculo conservativo según los resultados obtenidos en este trabajo, se podría esperar un incremento del 55 % de la difusividad efectiva por la aplicación de ultrasonidos. Esto supondría, por ejemplo, una disminución del tiempo de secado de unas 12.5 horas para alcanzar un contenido de 0.15 kg w/kg producto en las experiencias de secado de cubos de bacalao realizadas a -10 °C.



## **6. RECOMENDACIONES**

En base a los resultados obtenidos en este trabajo se puede sugerir continuar la investigación centrándose en los siguientes aspectos:

- Realizar experiencias de secado en lecho fluidizado con aplicación de ultrasonidos de potencia con productos de baja porosidad, como por ejemplo corteza de limón y berenjena.
- Profundizar en el estudio de la influencia del tipo de material en los efectos de los ultrasonidos trabajando con diferentes productos con el fin de analizar la influencia de la porosidad sobre los parámetros cinéticos de los modelos.
- Determinar la influencia de la temperatura en el secado acústico a diferentes niveles de potencia ultrasónica aplicada.
- Determinar la influencia de la aplicación de ultrasonidos de potencia en la calidad de los productos deshidratados.
- Desarrollar un nuevo sistema de aplicación de ultrasonidos de potencia para su instalación en un secadero convectivo provisto de bomba de calor.
- Determinar la influencia de los ultrasonidos en las cinéticas de secado en condiciones de liofilización a presión atmosférica.



## 7. NOMENCLATURA

<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>
$a_i$	Actividad componente i	
$a_w$	Actividad de agua	
$a_{w_{exp}}$	Actividad de agua experimental	
$a_{w_{calc}}$	Actividad de agua calculada	
$A_H$	Parámetro del modelo de Henderson	kg ms/kg w/K
$A_{Ha}$	Parámetro del modelo de Halsey	
$A_{OS}$	Parámetro del modelo de Oswin	kg w/kg ms
$A_r$	Constante de la ecuación de Riedel	K
b.h.	Contenido de humedad expresado en base húmeda	kg w/kg mt
b.s.	Contenido de humedad expresado en base seca	kg w/kg ms
$B_H$	Parámetro del modelo de Henderson	
$B_{Ha}$	Parámetro del modelo de Halsey	1/K
$B_{OS}$	Parámetro del modelo de Oswin	kg w/kg ms/K
$B_r$	Constante de la ecuación de Riedel	kg ms/kg w
c	Velocidad de la onda ultrasónica	m/s
$C_G$	Parámetro del modelo de GAB	
$C_H$	Parámetro del modelo de Henderson	K
$C_{Ha}$	Parámetro del modelo de Halsey	
$C_{OS}$	Parámetro del modelo de Oswin	
$C_o$	Conductancia	nF
$C_0$	Parámetro del modelo de GAB	
d	Distancia	m
$D_e$	Difusividad efectiva media	m <sup>2</sup> /s
$D_o$	Factor pre-exponencial de la ecuación de Arrhenius	m <sup>2</sup> /s
$D_{wa}$	Difusividad del agua en el aire	m <sup>2</sup> /s
E	Densidad de energía	J/m <sup>3</sup>
$E_a$	Energía de activación	kJ/mol
f	Frecuencia	Hz
$f_i$	Fugacidad componente i	
$f_i^0$	Fugacidad de referencia del componente i	
G	Conductancia	mS
$H_m$	Calor de sorción para la monocapa	kJ/mol
$H_n$	Calor de sorción para la multicapa	kJ/mol
HR	Humedad relativa	%
I	Intensidad acústica	W/m <sup>2</sup>

## NOMENCLATURA

---

$I_o$	Intensidad acústica en el origen	$W/m^2$
$I_o$	Intensidad acústica de referencia	$W/m^2$
$j_D$	Factor	
$k$	Coefficiente de transferencia de materia	$kg\ w/m^2/s$
$k_i$	Parámetros del modelo de Ratti ( $1 \leq i \leq 5$ )	
$K_G$	Parámetro del modelo de GAB	
$K_0$	Parámetro del modelo de GAB	
$L$	Semiespesor de la lámina infinita (Distancia característica)	$m$
$L_o$	Bobina de compensación	$mH$
$L_r$	Calor de vaporización del agua pura	$kJ/mol$
$ms$	Materia seca	
$mt$	Materia total	
$NPS$	Nivel de presión sonora	$dB$
$P$	Potencia acústica o ultrasónica	$W$
$P_{dB}$	Potencia acústica	$dB$
$P_A$	Presión acústica	$atm\ \text{ó}\ Pa\ \text{ó}\ bar$
$P_{AdB}$	Presión acústica	$dB$
$P_{A0}$	Presión acústica de referencia	$atm\ \text{ó}\ Pa\ \text{ó}\ bar$
$P_v$	Presión de vapor en la superficie del sólido	$atm\ \text{ó}\ Pa\ \text{ó}\ bar$
$P_v^0$	Presión de vapor del agua pura a la temperatura del sólido	$atm\ \text{ó}\ Pa\ \text{ó}\ bar$
$Q_s$	Calor isostérico de sorción	$kJ/mol$
$q_{sn}$	Calor isostérico neto de sorción	$kJ/mol$
$R$	Radio	$m$
$R_g$	Constante universal de los gases	$kJ/mol/K$
$Re$	Módulo de Reynolds	
$S$	Área	$m^2$
$Sc$	Módulo de Schmidt	
$St$	Módulo de Stanton	
$S_y$	Desviación estándar de la muestra	
$S_{yx}$	Desviación estándar de la estimación	
$t$	Tiempo	$s$
$T$	Temperatura	$K\ \text{ó}\ ^\circ C$
$V_f$	Volumen final	$m^3$
$V_o$	Volumen inicial	$m^3$
$w$	Agua	
$W$	Contenido de humedad medio	$kg\ w/kg\ ms$
$W_{calc}$	Contenido de humedad calculado	$kg\ w/kg\ ms$
$W_e$	Contenido de humedad de equilibrio	$kg\ w/kg\ ms$

---

---

**NOMENCLATURA**

$W_{exp}$	Contenido de humedad experimental	kg w/kg ms
$W_m$	Contenido de humedad de la monocapa	kg w/kg ms
$W_p$	Contenido de humedad puntual	kg w/kg ms
$W_0$	Contenido de humedad inicial	kg w/kg ms
$Z$	Impedancia acústica	$\Omega$
VAR	Varianza explicada	%
EMR	Error medio relativo	%

***Símbolos griegos***

$\alpha$	Parámetro de forma del modelo de Weibull	
$\alpha_a$	Coefficiente de atenuación o de absorción	
$\alpha_n$	Valores característicos	
$\beta$	Parámetro cinético del modelo de Weibull	s
$\beta_0$	Factor pre-exponencial de la ecuación de Arrhenius	s
$\Psi$	Humedad media adimensional	
$\lambda$	Longitud de onda	m
$\rho$	Densidad del medio	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{ss}$	Densidad del sólido seco	kg/m <sup>3</sup>
$\varphi_e$	Humedad relativa de equilibrio en la capa de aire en contacto con la superficie del sólido	
$\varphi_{aire}$	Humedad relativa en el seno de la corriente de aire	
$\Delta H_C$	Parámetro del modelo de GAB	kJ/mol
$\Delta H_K$	Parámetro del modelo de GAB	kJ/mol
$\Delta r$	Dimensión característica del sub-volumen en la dirección r	m
$\Delta t$	Incremento de tiempo	s
$\Delta x$	Dimensión característica del sub-volumen en la dirección x	m



**8. BIBLIOGRAFÍA**

- Abdelhaq, E.H., Labuza, T.P. (1987). Air drying characteristics of apricots. *Journal of Food Science* 52: 342-345.
- Abismaïl, B., Canselier, J.P., Wilhelm, A.M., Delmas, H., Gourdon, C. (1999). Emulsification by ultrasound: drop size distribution and stability. *Ultrasonics Sonochemistry* 6: 75-83.
- Abismaïl, B., Canselier, J.P., Wilhelm, A.M., Delmas, H., Gourdon, C. (2000). Emulsification processes: on-line study by multiple light scattering measurements. *Ultrasonics Sonochemistry* 7: 187-192.
- Achanta, S., Okos, M.R. (1996). Predicting the quality of dehydrated foods and biopolymers, Research needs and opportunities. *Drying Technology* 14: 1329-1368.
- Agustí, M. (2003). *Citricultura*. Mundi-Prensa, Madrid, España.
- Ahrne, L., Prothon, F., Funebo, T. (2003). Comparison of drying kinetics and texture effects of two calcium pretreatments before microwave-assisted dehydration of apple and potato. *International Journal of Food Science and Technology* 38: 411-420.
- Ajlouni, S., Sibrani, H., Premier, R., Tomkins, B. (2006). Ultrasonication and fresh produce (Cos lettuce) preservation. *Journal of Food Science* 71: M62-M68.
- Albu, S., Joyce, E., Paniwnyk, L., Lorimer, J.P., Mason, T.J. (2004). Potential for the use of ultrasound in the extraction of antioxidants from *Rosmarinus officinalis* for the food and pharmaceutical industry. *Ultrasonics Sonochemistry* 11: 261-265.
- Álvarez, I., Manas, P., Virto, R., Condon, S. (2006). Inactivation of *Salmonella Senftenberg* 775W by ultrasonic waves under pressure at different water activities. *International Journal of Food Microbiology* 108: 218-225.

---

**BIBLIOGRAFÍA**

- Alves-Filho, O. (2002). Combined innovative heat pump drying technologies and new cold extrusion techniques for production of instant foods. *Drying Technology* 20: 1541-1557.
- Alves-Filho, O., Strommen, I. (1996a). Performance and improvements in heat pump dryers. En *Proceedings IDS 1996, Cracovia, Polonia*.
- Alves-Filho, O., Strommen, I. (1996b). The application of heat pump in drying of biomaterials. *Drying Technology* 14: 2061-2090.
- Alves-Filho, O., Strommen, I., Thorbergsen, E. (1997). Simulation model of heat pump dryer plants for fruits and roots. *Drying Tecnology* 15: 1369-1398.
- Alves-Filho, O., Eikevik, T.M. , Mulet, A., Garau, C., Rosselló, C. (2006). Kinetics and mass transfer during atmospheric freeze drying of red pepper. En *Proceedings IDS 2006, Budapest, Hungría*.
- Anderson, R.B. (1946). Modification of the Brunauer, Emmett and Teller equation. *Journal of the American Chemical Society* 68: 686-691.
- AOAC (1997). Official methods of analysis. Association of Official Analytical Chemist, Arlington, Virginia, EEUU.
- Arkhangel'skii, M.E., Stanikov, Y.G. (1973). Diffusion in heterogeneous systems. En *Physical principles of ultrasonic technology*. Ed. Rozenberg, L.D., Plenum Press, New York, EEUU.
- ASAE (2000). ASAE D271.2 DEC99 Psychrometric Data. Ed. American Society of Agricultural Engineering, St. Joseph, EEUU.
- Azzouz, S., Guizani, A., Jomaa, W., Belghith, A. (2002). Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes. *Journal of Food Engineering* 55: 323-330.
- Balachandran, S., Kentish, S.E., Mawson, R., Ashokkumar, M. (2006). Ultrasonic enhancement of the supercritical extraction from ginger. *Ultrasonics Sonochemistry* 13: 471-479.

- Banga, J.R., Singh, R.P. (1994). Optimization of air drying of foods. *Journal of Food Engineering* 23: 189-211.
- Banga, J.R., Balsa-Canto, E., Moles, C.G., Alonso, A.A. (2003). Improving food processing using modern optimization methods. *Trends in Food Science and Technology* 14: 131-144.
- Basunia, M.A., Abe, T. (2001). Thin-layer solar drying characteristics of rough rice under natural convection. *Journal of Food Engineering* 47: 295-301.
- Baysal, T., Icier, F., Ersus, S., Yildiz, H. (2003). Effects of microwave and infrared drying on the quality of carrot and garlic. *European Food Research and Technology* 218: 68-73.
- Bellagha, S., Sahli, A., Glenza, A., Kechaou, N. (2005). Isohalic sorption isotherm of sardine (*Sardinilla aurita*): experimental determination and modelling. *Journal of Food Engineering* 68: 105-111.
- Ben-Mabrouk, S., Belghith, A. (1995). Numerical simulation of the drying of a deformable material: evaluation of the diffusion of coefficient. *Drying Technology* 13: 1789-1805.
- Benedito, J. (1998). Contribución a la caracterización de quesos mediante el uso de ultrasonidos de señal. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- Benedito, J., Cárcel J.A., Clemente, G., Mulet, A. (2000a). Cheese maturity assessment using ultrasonics. *Journal of Dairy Science* 83: 248-254.
- Benedito, J., Cárcel, J. A., González, R., Sanjuán, N. (2000b). Prediction of instrumental and sensory textural characteristics of Mahón cheese from ultrasonic measurements. *Journal of Texture Studies* 31: 631-643.
- Benedito, J., Cárcel, J.A., Rosselló, C., Mulet, A. (2001a). Composition assessment of raw meat mixtures using ultrasonics. *Meat Science* 57: 365-370.

---

## BIBLIOGRAFÍA

- Benedito, J., Cárcel, J.A., Gisbert, M., Mulet, A. (2001b). Quality control of cheese maturation and defects using ultrasonics. *Journal of Food Science* 66: 100-104.
- Benedito, J., Mulet, A., Velasco, J., Dobarganes, M.C. (2002). Ultrasonic assessment of oil quality during frying. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50: 4531-4536.
- Benedito, J., Mulet, A., Clemente, G., García-Pérez, J.V. (2004). Use of ultrasonics for the composition assessment of olive mill wastewater (alpechin). *Food Research International* 37: 595-601.
- Benedito, J., Simal, S., Clemente, G., Mulet, A. (2006). Manchego cheese texture evaluation by ultrasonics and surface probes. *International Dairy Journal* 16: 431-438.
- Berna, A., Rosselló, C., Cañellas, J., Mulet, A. (1990). Drying kinetics of apricots. *En Engineering and Food: Vol. 1. Physical properties and process control*, Elsevier Applied Science, Londres, Reino Unido.
- Bhatkhande, B.S., Samant, S.D. (1998). Ultrasound assisted PTC catalyzed saponification of vegetable oils using aqueous alkali. *Ultrasonics Sonochemistry* 5: 7-12.
- Bialobrzewski, I. (2007). Determination of the mass transfer coefficient during hot-air-drying of celery root. *Journal of Food Engineering* 78: 1388-1396.
- Bizot, H. (1983). Using the GAB model to construct sorption isotherms. *En Physical properties of foods*. Eds. Jowitt, R., Escher, F., Hallström, B., Meffert, H.F.T., Spiess, W.E.L., Vos, G., Applied Science Publishers, Londres, Reino Unido.
- Blasco, M. (2003). Contribución al estudio de la conservación de la *Curcuma longa* en vistas a la extracción de aceite esencial mediante FSC. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.

---

## BIBLIOGRAFÍA

- Blasco, M., García-Pérez, J.V., Bon, J., Carreres, J.E., Mulet, A. (2006). Effect of blanching and air flow rate on turmeric drying. *Food Science and Technology International* 12: 315-323.
- Bon, J. (1998). Contribución al estudio de la gestión integral de cámaras de maduración: Aplicación a la maduración del queso Mahón D.O. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- Bon, J., Sanjuán, N., Tarrazó, J., Mulet, A. (1994). Drying kinetics of broccoli. En *Proceedings of the Poster Session, ISOPOW Practicum II*, Universidad de las Américas, Puebla, México.
- Bon, J., Simal, S., Rosselló, C., Mulet, A. (1997). Drying characteristics of hemispherical solids. *Journal of Food Engineering* 34: 109-122.
- Borisov, Y.Y., Gynkina, N.M. (1973). Acoustic drying. En *Physical principles of ultrasonic technology*. Ed. Rozenberg, L.D., Plenum Press, New York, EEUU.
- Boucher, R.M.G. (1959). Drying by airborne ultrasonics. *Ultrasonics News* 3: 8.
- Boukouvalas, Ch.J., Krokida, M.K., Maroulis, Z.B., Marinos-Kouris, D. (2006). Density and porosity: literature data compilation for foodstuffs. *International Journal of Food Properties* 9: 715-746.
- Brunauer, S., Emmett, P.H., Teller, E. (1938). Adsorption of gases on multimolecular layers. *Journal of the American Chemical Society* 60: 1183-1187.
- Burgos, J., Condon, S., López, P., Ordóñez, J.A., Sala, F.J. (1994). Sterilization by manothermosonication. *PCT int. Pat. Appl. WO 93/19619*.
- Cai, L., Avramidis, S. (1997). A study on the separation of diffusion and surface emission coefficients in wood. *Drying Technology* 15: 1457-1473.

---

## BIBLIOGRAFÍA

- Camarena, F., Martínez-Mora, J.A. (2006). Potential of ultrasound to evaluate turgidity and hydration of the orange peel. *Journal of Food Engineering* 75: 503-507.
- Cárcel, J.A. (2003). Influencia de los ultrasonidos de potencia en procesos de transferencia de material. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- Cárcel, J.A., Benedito, J., Sanjuán, N., Sánchez, E. (1999). Aplicación de los ultrasonidos en las industrias de productos lácteos y derivados (y II). (Ultrasonidos de alta intensidad). *Alimentación, Equipos y Tecnología* Septiembre: 135-141.
- Cárcel, J.A., Cortés, I., Clemente, G., Mulet, A. (2002). Influencia de los ultrasonidos de potencia en la transferencia de calor por convección. *Symposium on Emerging Technologies for the Food Industry*, Madrid, España.
- Cárcel, J.A., Sanjuán, N., García-Pérez, J.V., Mulet, A. (2005). Modelización de la isoterma de desorción de caqui (*Dyospiros kaki*). En *Actas V Congreso Iberoamericano de Ingeniería de alimentos CIBIA 2005*, Puerto Vallarta, México.
- Cárcel, J., Benedito, J., Rosselló, C., Mulet, A. (2007). Influence of ultrasound intensity on mass transfer in apple immersed in a sucrose solution. *Journal of Food Engineering* 78: 472-479.
- Cardoni, A., MacBeath, A., Lucas, M. (2006). Methods for reducing cutting temperature in ultrasonic cutting of bone. *Ultrasonics* 44: e37-e42.
- Carlin, B. (1972). *Ultrasónica*. Urmo, Bilbao, España.
- Cháfer, M. (2000). Deshidratación osmótica de corteza de naranja (Valencia late) y madarina (Satsuma). Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.

- Cháfer, M., González-Martínez, C., Chiralt, A., Fito, P. (2003). Microstructure and vacuum impregnation response of citrus peels. *Food Research International* 36: 35-41.
- Chemat, F., Grondin, I., Shum Cheong Sing, A., Smadja, J. (2004a). Deterioration of edible oils during food processing by ultrasound. *Ultrasonics Sonochemistry* 11: 13-15.
- Chemat, F., Grondin, I., Costes, P., Moutoussamy, L., Shum Cheong Sing, A., Smadja, J. (2004b). High power ultrasound effects on lipid oxidation of refined sunflower oil. *Ultrasonics Sonochemistry* 11: 281-285.
- Chemat, S., Lagha, A., Ait Amar, H., Chemat, F. (2004c). Ultrasound assisted microwave digestion. *Ultrasonics Sonochemistry* 11: 5-8.
- Chen, J.P., Tai, C.Y., Chen, B.H. (2007). Effects of different drying treatments on the stability of carotenoids in Taiwanese mango (*Mangifera indica* L.). *Food Chemistry* 100: 1005-1010.
- Chirife, J. (1979). Fundamentals of the drying mechanism during air dehydration of foods. En *Advances in Drying*, Ed. Mujumdar, A.S., Hemisphere Pub. Co., New York, EEUU.
- Chirife, J., Iglesias, H.A. (1992). Estimation of the precision of isosteric heats of sorption determined from the temperature dependence of food isotherms. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie* 25: 83-84.
- Cho, Y., Hong, J., Chun, H., Lee, S., Min, H. (2006). Ultrasonication-assisted extraction of resveratrol from grapes. *Journal of Food Engineering* 77: 725-730.
- Chou, S.K., Chua, K.J. (2001). New hybrid drying technologies for heat sensitive foodstuffs. *Trends in Food Science & Technology* 12: 359-369.
- Chua, K.J., Chou, S.K., (2005). A comparative study between intermittent microwave and infrared drying of bioproducts. *International Journal of Food Science and Technology* 40: 23-29.
-

---

## BIBLIOGRAFÍA

- Clary, C.D., Wang, S.J., Petrucci, V.E. (2005). Fixed and incremental levels of microwave power application on drying grapes under vacuum. *Journal of Food Science* 70: 344-349.
- Clemente, G. (2003). Efecto de la contracción en la cinética de secado de músculos de jamón. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- Cohen, J.S., Yang, T.C.S. (1995). Progress in food dehydration. *Trends in Food Science & Technology* 6: 20-25.
- Coulson, J.M., Richardson, J.F. (1979). Sorption processes. En *Chemical Engineering III*, Ed. Richardson, J.F., Peacock, D.G., Pergamon Press, Londres, Reino Unido.
- Crank J. (1975). *The Mathematics of diffusion*. Clarendon Press, Oxford, Reino Unido.
- Cravotto, G., Omiccioli, G., Stevanato, L. (2005). An improved sonochemical reactor. *Ultrasonics Sonochemistry* 12: 213-217.
- Cross, H.R., Belk, K.E. (1994). Objective measurements of carcass and meat quality. *Meat Science* 36: 191-202.
- Cui, Z.W., Xu, S.Y., Sun, D.W. (2005). Temperature changes during microwave-vacuum drying of sliced carrots. *Drying Technology* 38: 471-477.
- Cunha, L.M., Oliveira, F.A.R., Oliveira, J.C. (1998). Optimal experimental design for estimating the kinetic parameters of processes described by the Weibull probability distribution function. *Journal of Food Engineering* 37: 175-191.
- Cunha, L.M., Oliveira, F.A.R., Aboim, A.P., Frías, J.M., Pinheiro-Torres, A. (2001). Stochastic approach to the modelling of water losses during osmotic and improved parameter estimation. *International Journal of Food Science and Technology* 36: 253-262.
- Da Mota, V.M., Palau, E. (1999). Acoustic drying of onion. *Drying Technology* 17: 855-867.

---

## BIBLIOGRAFÍA

- De Boer, J.M. (1953). The dynamic character of adsorption. Clarendon Press, Oxford, Reino Unido.
- De la Fuente, S., Riera, E., Gallego-Juárez, J.A. (2003). Estudio de los parámetros involucrados en el proceso de deshidratación ultrasónica de vegetales. TecniAcústica, Bilbao, España.
- De la Fuente, S., Rodríguez, G., Riera, E., Gallego, J.A., Mulet, A. (2005). Desarrollo de un sistema de secado mediante lecho fluido asistido por ultrasonidos de potencia. Revista de Acústica 36: 19-25.
- De la Fuente, S., Riera, E., Acosta, V.M., Blanco, A., Gallego-Juárez, J.A. (2006). Food drying process by power ultrasound. Ultrasonics 44: e523-e527.
- Devahastin, S., Suvarnakuta, P., Soponronnarit, S., Mujumdar, A.S. (2004). A comparative study of low-pressure superheated steam and vacuum drying of a heat-sensitive material. Drying Technology 22: 1845-1867.
- Di Matteo, P., Donsi, G., Ferrari, G. (2003). The role of heat and mass transfer phenomena in atmospheric freeze-drying of foods in a fluidised bed. Journal of Food Engineering 59: 267-275.
- Diosady, L.L., Rizvi, S.S.H., Cai, W., Jagdeo, D.J. (1996). Moisture sorption isotherms of canola meals, and applications to packaging. Journal of Food Science 61: 204-208.
- Doymaz, I. (2004). Convective air drying characteristics of thin layer carrots. Journal of Food Engineering 61: 359-364.
- Eikevik, T.M., Strommen, I., Alves-Filho, O., Hemmingsen, A.K.T. (2005). Effect of operating conditions on atmospheric freeze dried cod fish. Proceedings of 3<sup>rd</sup> Inter-American Drying Conference, Montreal, Canadá.
- Ensminger, D. (1988). Acoustic and electroacoustic methods of dewatering and drying. Drying Technology 6: 473-499.

---

## BIBLIOGRAFÍA

- Entezari, M.H., Keshavarzi, A. (2001). Phase-transfer catalysis and ultrasonic waves II: saponification of vegetable oil. *Ultrasonics Sonochemistry* 8: 213-216.
- Everett, D.H. (1967). Adsorption hysteresis. In the solid-gas interface. Marcel Dekker, New York, EEUU.
- Fairbanks, H.V. (1975). Applying ultrasound to continuous drying process. *Ultrasonic International 1975 Conference Proceedings*, Guildford, Reino Unido.
- Fairbanks, H.V. (1979). Influence of ultrasound upon heat transfer systems. *Ultrasonics Symposium Proceedings*, New Orleans, EEUU.
- Fairbanks, H.V., Otsuka, T. (1977). Ultrasonic assist in radiant heat transfer into water and air. *Ultrasonics Symposium Proceedings*, Arizona, EEUU.
- Funebo, T., Ahrne, L., Prothon, F., Kidman, S., Langton, M., Skjoldebrand, C. (2002). Microwave and convective dehydration of ethanol treated and frozen apple-physical properties and drying kinetics. *International Journal of Food Science and Technology* 37: 603-614.
- Gabaldón-Leyva, C.A., Quintero-Ramos, A., Barnard, J., Balandrán-Quintana, R., Talamás-Abbud, R., Jiménez-Castro, J. (2007). Effect of ultrasound on the mass transfer and physical changes in brine bell pepper at different temperatures. *Journal of Food Engineering* 81: 374-379.
- Gaffney, J.B. (1996). Process for making cheese from enzyme curds. US Patent 386168.
- Gallego-Juárez, J.A. (1998). Some applications of air-borne power ultrasound to food processing. En *Ultrasound in Food Processing*. Eds. Povey, M.J.W., Mason, T.J., Chapman & Hall, Londres, Reino Unido.
- Gallego-Juárez, J.A. (1999). Transductores ultrasónicos de potencia. En *Red Iberoamericana de Tecnologías Ultrasónicas. Primeras Jornadas de Ultrasonidos*. Eds. Lejía, L., Rodríguez, M.A., González, G., Veca, A.C.
-

- Servicio de Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia, España.
- Gallego-Juárez, J.A., Rodríguez, G., San Emeterio, J.L., Montoya, F. (1994). Electroacustics unit for generating high sonic and ultrasonic intensities in gases and interfaces. US Patent 5299175.
- Gallego-Juárez, J.A., Rodríguez-Corral, G., Gálvez-Moraleda, J.C., Yang, T.S. (1999). A new high intensity ultrasonic technology for food dehydration. *Drying Technology* 17: 597-608.
- García-Pascual, P. (2004). Deshidratación y conservación de setas silvestres: *Morchella esculenta* y *Boletus edulis*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- García-Pascual, P., Alves-Filho, O., Eikevik, T.M., Strommen, I. (2004). Freeze drying of peas at atmospheric pressure. *Alimentacion Equipos y Tecnologia* 23: 74-78.
- Garau, M.C., Simal, S., Femenia, A., Rosselló, C. (2006). Drying of orange skin: drying kinetics modelling and functional properties. *Journal of Food Engineering* 75: 288-295.
- Gaston, A.L., Abalone, R.M., Giner, S.A. (2002). Wheat drying kinetics. Diffusivities for sphere and ellipsoid by finite elements. *Journal of Food Engineering* 52: 313-322.
- Ghaedian, R., Decker, E.A., McClements, D.J. (1997). Use of ultrasound to determine cod fillet composition. *Journal of Food Engineering* 62: 500-504.
- Gisbert, M. (2001). Influencia de las variables de proceso en la evolución físico-química y bioquímica del lomo embuchado. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- Glasscock, D.A., Hale, J.C. (1994). Process simulation: the art and science of modelling. *Chemical Engineering* noviembre: 82-89.

---

## BIBLIOGRAFÍA

- Gong, C.L., Hart, D.P. (1998). Ultrasound induced cavitation and sonochemical yields. *The Journal of the Acoustical Society of America* 104: 2675-2682.
- Got, F., Culioli, J., Berge, P., Vignon, X., Astruc, T., Quideau, J.M., Lethiecq, M. (1999). Effects of high-intensity high-frequency ultrasound on ageing rate, ultrastructure and some physico-chemical properties of beef. *Meat Science* 51: 35-42.
- Guggenheim, E.A. (1966). *Application of statistical mechanics*. Clarendon Press, Oxford, Reino Unido.
- Gunasekaran, S., Ay, C. (1996). Milk coagulation cut-time determination using ultrasonics. *Journal of Food Process Engineering* 19: 63-73.
- Halsey, G. (1948). Physical adsorption on non uniform surface. *Journal of Chemical Physics* 16: 931-937.
- Hasatani, M., Kobayashi, N., Li, Z. (2001). Drying and dewatering R&D in Japan. *Drying Technology* 19: 1223-1251.
- Hassan, B.H., Hobani, A.I. (2000). Thin-layer drying of dates. *Journal of Food Process Engineering* 23: 177-189.
- Hatamipour, M.S., Mowla, D. (2002). Shrinkage of carrots during drying in an inert medium fluidized bed. *Journal of Food Engineering* 55: 247-252.
- Henderson, S.M. (1952). A basic concept of equilibrium moisture. *Agricultural Engineering* 33: 29-32.
- Hu, A., Zhao, S., Liang, H., Qiu, T., Chen, G. (2006). Ultrasound assisted supercritical fluid extraction of oil and coixenolide from adlay seed. *Ultrasonics Sonochemistry* 14: 219-224.
- Irudayaraj, J., Wu, Y, (1999). Numerical modelling of heat and mass transfer in starch systems. *Transactions of the ASAE* 42: 449-455.

- Isse, M.G., Schuchmann, H., Schubert, H. (1993). Divided sorption isotherm concept: an alternative way to describe sorption isotherm data. *Journal of Food Process Engineering* 16: 147-157.
- Jambrak, A.R., Mason, T.J., Paniwnyk, L., Lelas, V. (2007). Accelerated drying of button mushrooms, Brussels sprouts and cauliflower by applying power ultrasound and its rehydration properties. *Journal of Food Engineering* 81: 88-97.
- Javanaud, C. (1988). Applications of ultrasound to food systems. *Ultrasonics* 26: 117-123.
- Jayasooriya, S.D., Bhandari, B.R., Torley, P., D'Arcy, B.R. (2004). Effect of high power ultrasound waves on properties of meat: a review. *International Journal of Food Properties* 7: 301-319.
- Jiménez, A., Beltrán, G., Uceda, M. (2007). High-power ultrasound in olive paste pretreatment. Effect on process yield and virgin olive oil characteristics. *Ultrasonics Sonochemistry* en prensa.
- Jones, P.L. (1992). Electromagnetic wave energy in drying processes. En *Proceedings IDS'92, Amsterdam, Holanda*.
- Jumah, R. (2005). Modelling and simulation of continuous and intermittent radio frequency-assisted fluidized bed drying of grains. *Food and Bioproducts Processing* 83: 203-210.
- Kamyar, H., Aguirre, C.G. (1999). Adaptive and stochastic finite element analysis in drying. *Drying Technology* 17: 2037-2053.
- Karathanos, V.T., Belessiotis, V.G. (1997). Sun and artificial air drying kinetics of some agricultural products. *Journal of Food Engineering* 31: 35-46.
- Karathanos, V.T., Belessiotis, V.G. (1999). Application of a thin-layer equation to drying data of fresh and semi-dried fruits. *Journal of Agricultural Engineering Research* 74: 355-361.

- Katekawa, M.E., Silva, M.A.A. (2006). A review of drying models including shrinkage effects. *Drying Technology* 24: 5-20.
- Kaymak-Ertekin, F., Saltanoglu, M. (2001). Moisture sorption isotherm characteristics of peppers. *Journal of Food Engineering* 47: 225-231.
- Keat Ooi, S., Biggs, S. (2000). Ultrasonic initiation of polystyrene latex synthesis. *Ultrasonics Sonochemistry* 7: 125-133.
- Khalloufi, S., Giasson, J., Ratti, C. (2000). Water activity of freeze dried mushrooms and berries. *Canadian Agricultural Engineering* 42: 51-56.
- Kimbaris, A.C., Siatas, N.G., Daferera, D.J., Tarantilis, P.A., Pappas, C.S., Polissiou, M.G. (2006). Comparison of distillation and ultrasound-assisted extraction methods for the isolation of sensitive aroma compounds from garlic (*Allium sativum*). *Ultrasonics Sonochemistry* 13: 54-60.
- Krokida, M.K., Zogzas, N.P., Maroulis, Z.B. (2001). Mass transfer coefficient in food processing: compilation of literature data. *International Journal of Food Properties* 4: 373-382.
- Krokida M.K., Maroulis, Z.B., Marinos-Kouris, D. (2002). Heat and mass transfer coefficients in drying: compilation of literature data. *Drying Technology* 20: 1-18.
- Kuttruff, H. (1991). *Ultrasonics. Fundamentals and applications*. Elsevier, Londres, Reino Unido.
- Labuza, T.P. (1975). Interpretation of sorption data in relation to the state of constituent water. En *Water relations of foods*. Ed. Duckworth, R.B., Academic Press, New York, EEUU.
- Lahsasni, S., Kouhila, M., Mahrouz, M., Kechaou, N. (2002). Experimental study and modelling of adsorption and desorption isotherms of prickly pear peel (*Opuntia ficus indica*). *Journal of Food Engineering* 55: 201-207.

- Leung, H.K. (1986). Water activity and other colligative properties of foods. En Physical and chemical properties of foods, Ed. Okos, M.R., ASAE, St. Joseph, EEUU.
- Lewicki, P.P. (1998). A three parameter equation for food moisture sorption isotherms. *Journal of Food Process Engineering* 21: 127-144.
- Lewicki, P.P. (2004). Water as determinant of food engineering properties. A review. *Journal of Food Engineering* 61: 483-495.
- Lewicki, P.P. (2006). Design of hot air drying for better foods. *Trends in Food Science & Technology* 17: 153-163.
- Lewicki, P.P., Witrowa-Rajchert, D., Nowak, D. (1998). Effect of drying mode on drying kinetics of onion. *Drying Technology* 16: 59-81.
- Lewicki, P.P., Michaluk, E. (2004). Drying of tomato pretreated with calcium. *Drying Technology* 22: 1813-1827.
- Lewis, W.K. (1921). The rate of drying of solid materials. *Ind. Engnd. Chem.* 13: 427-432.
- Li, B., Sun, D.W. (2002). Effect of power ultrasound on freezing rate during immersion freezing. *Journal of Food Engineering* 55: 277-282.
- Lillard, H.S. (1994). Decontamination of poultry skin by sonication. *Food Technology* diciembre: 72-73.
- Lim, L.T., Tang, J., He, J. (1995). Moisture sorption characteristics of freeze dried blueberries. *Journal of Food Science* 60: 64-68.
- Lima, M., Sastry, S.K. (1990). Influence of fluid rheological properties and particle location on ultrasound-assisted heat transfer between liquid and particles. *Journal of Food Science* 55: 1112-1115.
- Lin, S.X.Q., Xiao-Dong-Chen, Pearce, D.L. (2005). Desorption isotherm of milk powders at elevated temperatures and over a wide range of relative humidity. *Journal of Food Engineering* 68: 257-264.

- Lipson, C, Sheth, N.J. (1973). Statistical design and analysis of engineering experiments. Mc Graw Hill, New York, EEUU.
- Llull, P., Simal, S., Benedito, J., Rosselló, C. (2002). Evaluation of textural properties of a meat-based product (sobrassada) using ultrasonic techniques. *Journal of Food Engineering* 53: 279-285.
- Loop, A., Weber, H. (2005). Research into the optimising the tenderness of beef from parts of the forequarter. *Fleischwirtschaft* 85: 111-116.
- López, A., Iguaz, A., Esnoz, A., Virseda, P. (2000). Thin-layer drying behaviour of vegetable wastes from wholesale market. *Drying Technology* 18: 995-1006.
- Lucas, M., MacBeath, A., McCulloch, E., Cardoni, A. (2006). A finite element model for ultrasonic cutting. *Ultrasonics* 44: e503-e509.
- Lying, J.G., Allen, P., McKenna, B.M. (1998). The effect on aspects of beef tenderness of pre- and post-rigor exposure to a high intensity ultrasound probe. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 78: 308-314.
- MacCarthy, D. (1986). Concentration and drying of foods. Elsevier, Londres, Reino Unido.
- Maroulis, Z.B., Saravacos, G.D., Panagiotou, N.M., Krokida, M.K. (2001). Moisture diffusivity data compilation for foodstuffs: effect of material moisture content and temperature. *International Journal of Food Properties* 4: 225-237.
- Martínez-Navarrete, N., Andrés, A., Chiralt, A., Fito, P. (2000). Termodinámica y cinética de sistemas alimento entorno. Servicio de Publicaciones Universidad Politécnica de Valencia, España.
- Mason, T.J. (1998). Power ultrasound in food processing. The way forward. En *Ultrasound in Food Processing*. Eds. Povey, M.J.W., Mason, T.J., Chapman & Hall, Londres, Reino Unido.
- Mason, T.J., Cordemans, E.D. (1996). Ultrasonic intensification of chemical processing and related operations: A review. *Trans IchemE*. 74: 511-516.

---

## BIBLIOGRAFÍA

- Mason, T.J., Paniwnyk, L., Lorimer, J.P. (1996). The use of ultrasound in food technology. *Ultrasonics Sonochemistry* 3: S253-S256.
- Mason, T.J., Lorimer, J.P. (2002). *Applied sonochemistry. The uses of power ultrasound in chemistry and processing.* Wiley-VCH, Weinheim, Alemania.
- Mathlouthi, M. (2001). Water content, water activity, water structure and the stability of foodstuffs. *Food Control* 12: 409-417.
- Mayor, L., Sereno, A.M. (2004). Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering* 61: 373-386.
- Mazza, G., Lemaguer, M. (1980). Dehydration of onion: some theoretical and practical considerations. *Journal of Food Technology* 15: 181-194.
- McClements, D.J. (1997). Ultrasonic characterization of food and drinks: Principles, methods and applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 37: 1-46.
- McClements, D.J., Povey, M.J.W. (1987). Solid fat content determination using ultrasonic velocity measurement. *International Journal of Food Science and Technology* 59: 697-701.
- McMinn, W.A.M., Magee, T.R.A. (1997). Moisture sorption characteristics of starch materials. *Drying Technology* 15: 1527-1551.
- Miranda, G. (2003). Influencia de la temperatura, el envase y la atmósfera en la conservación de uvas pasas y de albaricoques deshidratados. Tesis Doctoral. Universidad de Valencia.
- Mittal, G.S. (1999). Mass diffusivity of food products. *Food Reviews International* 15: 19-66.
- Mizrach, A. (2004). Assessing plum fruit quality attributes with an ultrasonic method. *Food Research International* 37: 627-631.
- Mizrach, A., Galili, N., Rosenhouse, G. (1994). Determining quality of fresh products by ultrasonic excitation. *Food Technology* 42: 68-71.

---

**BIBLIOGRAFÍA**

- Mizrach, A., Bechar, A., Grinshpon, Y., Hofman, A., Egozi, H., Rosenfeld, L. (2003). Ultrasonic classification of mealiness in apples. *Transactions of the ASAE* 46: 397-400.
- Moulton, K.J., Koritala, S., Warner, K., Frankel, E.N. (1987). Continuous ultrasonic hydrogenation of soybean oil. II. Operating conditions and oil quality. *Journal of American Oil Chemist Society* 64: 542-547.
- Moulton, K.J., Mounts, T.L. (1990). Continuous ultrasonic degumming of crude soybean oil. *Journal of the American Oil Chemist Society* 67: 33-38.
- Mujumdar, A.S., Menon, A.S. (1995). Drying of solids: principles, clasification and selection of dryers. En *Handbook of Industrial Drying*, Ed. Mujumdar, A.S., Marcel Dekker, New York, EEUU.
- Mujumdar, A.S., Devahastin, S. (2000). Fundamentals principles of drying. En *Mujumdar's practical guide to industrial drying*, Energex Corporation, Québec, Canada.
- Mulet, A. (1994). Drying modelling and water diffusivity in carrots and potatoes. *Journal of Food Engineering* 22: 329-348.
- Mulet, A., Berna, A., Borrás, M., Piñaga, F. (1987). Effect of air flow rate on carrot drying. *Drying Technology* 5: 245-258.
- Mulet, A., Berna, A., Rosselló, C. (1989a). Drying of carrots I. Drying models. *Drying Technology* 7: 537-557.
- Mulet, A., Berna, A., Rosselló, C., Piñaga, F. (1989b). Drying of carrots II. Evaluation of drying models. *Drying Technology* 7: 641-661.
- Mulet, A., García-Reverter, J., Sanjuán, R., Bon, J. (1999a). Sorption isosteric heat determination by thermal analysis and sorption isotherms. *Journal of Food Science* 64: 64-68.
- Mulet, A., Benedito, J., Bon, J., Sanjuán, N. (1999b). Low intensity ultrasonics in food technology. *Food Science and Technology International* 5: 285-297.

---

## BIBLIOGRAFÍA

- Mulet, A., Benedito, J., Bon, J., Rosselló, C (1999c). Ultrasonic velocity in Cheddar cheese as affected by temperature. *Journal of Food Science* 64: 1038-1041.
- Mulet, A., Sanjuán, N., Bon, J., Simal, S. (1999d). Drying model for highly porous hemispherical bodies. *European Food Research and Technology* 210: 80-83.
- Mulet, A., Garcia-Reverter, J., Bon, J., Berna, A. (2000). Effect on shape on potato and cauliflower shrinkage during drying. *Drying Technology* 18: 1201-1219.
- Mulet, A., García-Pascual, P., Sanjuán, N., García-Reverter, J. (2002a). Equilibrium isotherms and isosteric heats of morel (*Morchella esculenta*). *Journal of Food Engineering* 53: 75-81.
- Mulet, A., Benedito, J., Golas, Y., Cárcel, J.A. (2002b). Noninvasive ultrasonic measurements in the food industry. *Food Reviews International* 18: 123-133.
- Mulet, A., Cárcel, J., Benedito, J., Rosselló, C., Simal, S. (2003a). Ultrasonic mass transfer enhancement in food processing. En *Transport Phenomena in Food Processing*. Ed. Welti-Chanes, J., Vélez-Ruiz, J., Barbosa-Canova, G., CRC Press, New York, EEUU.
- Mulet, A., Cárcel, J.A., Sanjuán, N., Bon, J. (2003b). New food drying technologies-Use of ultrasound. *Food Science and Technology International* 9: 215-221.
- Mulet, A., Blasco, M., García-Reverter, J., García-Pérez, J.V. (2005). Drying kinetics of *Curcuma longa* rhizomes. *Journal of Food Science* 7: E318-E323.
- Muralidhara, H.S., Ensminger, D., Putnam, A. (1985). Acoustic dewatering and drying (low and high frequency): State of the art review. *Drying Technology* 3: 529-566.
- Nakagawa, S., Yamashita, T., Miura, H. (1996). Ultrasonic drying of walleye Pollack surimi. *Nippon Shokutin Kagaku Kagaku Kaishi* 43: 388-394.

- Nguyen, T.A., Verboven, P., Daudin, J.D., Nicolai, B.M. (2004). Measurement and modelling of water sorption isotherms of "Conference" pear flesh tissue in the high humidity range. *Postharvest Biology and Technology* 33: 229-241.
- Nijhuis, H.H., Topping, H.M., Muresan, S., Yuksel, D., Leguijt, C., Kloek, W. (1998). Approaches to improving the quality of dried fruit and vegetables. *Trends in Food Science and Technology* 9: 13-20.
- Ordóñez, J.A., Aguilera, M.A., García, M.L., Sanz, B. (1987). Effect of combined ultrasonic and heat treatment (Thermoultrasonication) on the survival of a strain of *Staphylococcus aureus*. *Journal of Dairy Research* 54: 61-67.
- Oswin, C.R. (1983). Isotherm and package life: some advances in embalistics. *Food Chemistry* 12: 179-188.
- Panyawong, S., Devahastin, S. (2007). Determination of deformation of a food product undergoing different drying methods and conditions via evolution of a shape factor. *Journal of Food Engineering* 78: 151-161.
- Perry, R.H., Green, D.W., Maloney, J.O. (1992). Perry. Manual del Ingeniero químico. McGraw Hill, Naucalpan de Juárez, México.
- Perry, R.H., Green, D.W. (1997). Chemical engineers handbook. McGraw Hill, New York, EEUU.
- Plaza, L., de Ancos, B., Cano, M.P. (2003). Nutritional and health-related compounds in sprouts and seeds of soybean (*Glycine max*), wheat (*Triticum aestivum* L.) and alfalfa (*Medicago sativa*) treated by a new drying method. *European Food Research and Technology* 216: 138-144.
- Pohlman, F.W., Dikeman, M.E., Kropf, D.H. (1997). Effect of high intensity ultrasound treatment, storage time and cooking method on shear, sensory, instrumental colour and cooking properties of packaged and unpackaged beef pectorals muscle. *Meat Science* 46: 89-100.
- Povey, M.J.W. (1997). Ultrasonic techniques for fluids characterization. Academic Press, San Diego, EEUU.
-

- Povey, M.J.W. (1998). Rapid determination for food materials properties. En *Ultrasound in Food Processing*. Eds. Povey, M.J.W., Mason, T.J., Chapman&Hall, Londres, Reino Unido.
- Quartly-Watson, T. (1998). The importance of power ultrasound in cleaning and disinfection in the poultry industry-a case study. En *Ultrasound in Food Processing*. Eds. Povey, M.J.W., Mason, T.J., Chapman&Hall, Londres, Reino Unido.
- Raj, B., Rajendran, V., Palanichamy, P. (2004). *Science and technology of ultrasonics*. Alpha Science International, Oxford, Reino Unido.
- Rao, K.S. (1941). Hysteresis in sorption I-VI. *Journal of Physical Chemistry* 45: 500-539.
- Raso, J., Mañas, P., Pagán, R., Sala, F.J. (1999). Influence of different factors on the output power transferred into medium by ultrasound. *Ultrasonics Sonochemistry* 5: 157-162.
- Ratti, C. (2001). Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review. *Journal of Food Engineering* 49: 311-319.
- Ratti, C., Crapiste, G.H., Rotsein, E. (1989). A new water sorption equilibrium expression for solids based on the thermodynamic considerations. *Journal of Food Science* 54: 738-742.
- Raviyan, P., Zhang, Z., Feng, H (2005). Ultrasonication for tomato pectinmethylesterase inactivation: effect of cavitation intensity and temperature on inactivation. *Journal of Food Engineering* 70: 189-196.
- Rawson, F.F. (1998). An introduction to ultrasonic food cutting. En *Ultrasound in Food Processing*. Eds. Povey, M.J.W., Mason, T.J., Chapman & Hall, Londres, Reino Unido.
- Recuero, M. (1995). *Ingeniería acústica*. Paraninfo, Madrid, España.

- Reyes, A., Alvarez, P. I., Maquardt, F.H. (2002). Drying of carrots in a fluidized bed. Effects of drying conditions and modelling. *Drying Technology* 20: 1463-1483.
- Riedel, L. (1977). Calorimetric measurements of heats of hydration of foods. *Chemic. Mikrobiologie und Technologie der Lebensmittel* 5: 97-101.
- Riera, E., Gallego-Juárez, J.A., Rodríguez-Corral, G., Acosta, V.M., Andrés, E. (2002). Application of high-power ultrasound for drying vegetables. *Forum Acousticum*, Sevilla, España.
- Riera, E., Golas, Y., Blanco, A., Gallego, J.A., Blasco, M., Mulet, A. (2004). Mass transfer enhancement in supercritical fluids extraction by means of power ultrasound. *Ultrasonics Sonochemistry* 11: 241-244.
- Rockland, L.B., Beuchat, L.R. (1987). *Water activity: Theory and applications to food*. Institute of Food Technologist. Chicago, EEUU.
- Romdhane, M., Gourdon, C. (2002). Investigations in solid-liquid extraction: influence of ultrasound. *Chemical Engineering Journal* 87: 11-19.
- Roshenow, W.M., Choi, H. (1961). *Heat, mass and momentum transfer*. International Series in Engineering. Prentice-Hall, Inc, New Jersey, EEUU.
- Rosselló, C. (1986). Efecto de la contracción de volumen en la cinética de secado de zanahorias. Tesis Doctoral. Universitat de les Illes Balears.
- Rosselló, C., Cañellas, J., Simal, S., Berna, A. (1992). Simple mathematical model to predict the drying rates of potatoes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 40: 2374-2378.
- Ruiz-Cabrera M.A., Foucat, L., Bonny, J.M., Renou, J.P., Daudin, J.D. (2005a). Assessment of water diffusivity in gelatine gel from moisture profiles. I. Non-destructive measurement of 1D moisture profiles during drying from 2D nuclear magnetic resonance images. *Journal of Food Engineering* 68: 209-219.

---

## BIBLIOGRAFÍA

- Ruiz-Cabrera M.A., Foucat, L., Bonny, J.M., Renou, J.P., Daudin, J.D. (2005b). Assessment of water diffusivity in gelatine gel from moisture profiles. II. Data processing adapted to material shrinkage. *Journal of Food Engineering* 68: 221-231.
- Ruiz-Díaz, G., Martínez-Monzó, J., Fito, P., Chiralt, A. (2003). Modelling of dehydration–rehydration of orange slices in combined microwave/air drying. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 4: 203-209.
- Ruiz-López, I.I., Córdova, A.V., Rodríguez-Jimenes, G.C., García-Alvarado, M.A. (2004). Moisture and temperatura evolution during food drying: effect of variable properties. *Journal of Food Engineering* 63: 117-124.
- Saad, Y. (1995). Iterative methods for sparse linear systems. Pws Publishing Company, Boston, EEUU.
- Sablani, S.S., Myhara, R.M., Maghoub, Al-Attabi, Z.H., Al-Mugheiry, M.M. (2001). Water sorption of freeze dried fish sardines. *Drying Technology* 19: 673-680.
- Sajas, J.F., Gorbatow, W.M. (1978). Anwendung von ultraschallschwingungen in den technologischen vorgängen der fleischindustrie. *Die Flischwirtschaft* 6: 1009-10021.
- Samaniego-Esguerra, C.M., Boag, I.F., Robertson, G.L. (1991). Comparison of regression methods for fitting the GAB model to the moisture isotherms of some dried fruit and vegetables. *Journal of Food Engineering* 13: 115-133.
- Sánchez, E.S., Sanjuán, N., Simal, S., Rosselló, C. (1997). Calorimetric techniques applied to the determination of isosteric heat of desorption for potato. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 74: 57-63.
- Sánchez, E.S., Simal, S., Femenía, A., Bedito, J., Rosselló, C. (1999). Influence of ultrasound on mass transport during cheese brining. *European Food Research and Technology* 209: 215-219.

---

## BIBLIOGRAFÍA

- Sánchez, E.S., Simal, S., Femenía, A., Rosselló, C. (2000). Effect of acoustic brining on the transport of sodium chloride and water in Mahon cheese. *European Food Research and Technology* 212: 39-43.
- Sánchez, E.S., Simal, S., Femenía, A., Benedito, J., Rosselló, C. (2001a). Effect of acoustic brining on lipolysis and on sensory characteristics of Mahon cheese. *Journal of Food Science* 66: 892-896.
- Sánchez, E.S., Simal, S., Femenía, A., Llul, P., Rosselló, C. (2001b). Proteolysis of Mahon cheese as affected by acoustic-assisted brining. *European Food Research and Technology* 212: 147-152.
- Sanjuán, N. (1998). Influencia de las condiciones de proceso y almacenamiento en la calidad de Brócoli deshidratado. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- Sanjuán, N., Clemente, G., Bon, J., Mulet, A. (2003). Changes in the quality of dehydrated broccoli florets. *Journal of Food Engineering* 62: 15-21.
- Sanjuán, N., Lozano, M., García-Pascua, P., Mulet, A. (2004). Dehydration kinetics of red pepper (*Capsicum annuum L* var Jaranda). *Journal of the Science of Food and Agriculture* 83: 697-701.
- Sanjuán, R., García-Reverter, J., Bon, J., Mulet, A. (1994). Moisture retention in chufa (*Cyperus esculentus L.*) equilibrium isotherms and isosteric heats. *Revista Española de Ciencia y Tecnología de Alimentos* 34: 653-662.
- Sastry, S.K., Shen, G.Q., Blaisdell, J.L. (1989). Effect of ultrasonic vibration on fluid-to-particle convective heat transfer coefficients. *Journal of Food Science* 54: 229-230.
- Scott, K.J., Baker, K.C. (1947). Anatomy of Whashington Navel orange rind in relation to water spot. *Botanical Gazette* 108: 459-475.
- Senadeera, W., Bhandari, B.R., Young, G., Wijesinghe, B. (2003). Influence of shapes of selected vegetable materials on drying kinetics during fluidized bed drying. *Journal of Food Engineering* 58: 277-283.
-

---

## BIBLIOGRAFÍA

- Senapati, N. (1991). Ultrasound in chemical processing. En *Advances in sonochemistry*. Ed. Mason, T.J., JAI Press Ltd., Londres, Reino Unido.
- Seymour, I.J., Burfoot, D., Smith, R.L., Cox, L.A., Lockwood, A. (2002). Ultrasound decontamination of minimally processed fruits and vegetables. *International Journal of Food Science and Technology* 37: 547-557.
- Sharma, A., Gupta, M.N. (2006). Ultrasonic pre-irradiation effect upon aqueous enzymatic oil extraction from almond and apricot seeds. *Ultrasonics Sonochemistry* 13: 529-534.
- Sherwood, T.K. (1929). The drying of solids. *Ind. Engng. Chem.* 21: 12-16.
- Simal, S., Berna, A., Mulet, A., Rosselló, C. (1993). A method for the calculation of heat transfer coefficient in potato drying. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 63: 365-367.
- Simal, S., Mulet, A., Catala, P.J., Cañellas, J., Rosselló, C. (1996). Moving boundary model for simulating moisture movement in grapes. *Journal of Food Science* 61: 157-160.
- Simal, S., Rosselló, C., Berna, A., Mulet, A. (1998a). Drying of shrinking cylinder-shaped bodies. *Journal of Food Engineering* 37: 423-435.
- Simal, S., Rosselló, C., Mulet, A. (1998b). Modelling of air drying in regular shaped bodies. *Trends in Chemical Engineering* 4: 171-180.
- Simal, S., Benedito, J., Sánchez, E.S., Rosselló, C. (1998c). Influence of ultrasound to increase mass transport rates during osmotic dehydration. *Journal of Food Engineering* 36: 323-336.
- Simal, S., Femenía, A., García-Pascual, P., Rosselló, C. (2003a). Simulation of the drying curves of a meat-based product: effect of the external resistance to mass transfer. *Journal of Food Engineering* 58: 193-199.

---

## BIBLIOGRAFÍA

- Simal, S., Benedito, J., Clemente, G., Femenía, A., Rosselló, C. (2003b). Ultrasonic determination of the composition of a meat-based product. *Journal of Food Engineering* 58: 253-257.
- Simal, S., Femenía, A., Garau, M.C., Rosselló, C. (2005a). Use of exponential, Page's and diffusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit. *Journal of Food Engineering* 66: 323-328.
- Simal, S., Femenia, A., Cárcel, J.A., Rosselló, C. (2005b). Mathematical modelling of the drying curves of kiwi fruits: influence of the ripening stage. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 85: 425-432.
- Simal, S., Garau, M.C., Femenía, A., Rosselló, C. (2005c). Drying of red pepper (*Capsicum Annuum*): Water desorption and quality. *International Journal of Food Engineering* 1: Article 1.
- Spiegel-Roy, P., Goldschmidt, E.E. (1996). *Biology of citrus*. University Press, Cambridge, Reino Unido.
- Srikiatden, J., Roberts, S.S. (2006). Measuring moisture diffusivity of potato and carrots (core and cortex) during convective hot air and isothermal drying. *Journal of Food Engineering* 74: 143-152.
- Stack, L.J., Carney, P.A., Malone, H.B., Wessels, T.K. (2005). Factors influencing the ultrasonic separation of oil-in-water emulsions. *Ultrasonics Sonochemistry* 12: 153-160.
- Stavarache, C., Vinatoru, M., Nishimura, R., Maeda, Y. (2005). Fatty acids methyl esters from vegetable oil by means of ultrasonic energy. *Ultrasonics Sonochemistry* 12: 367-372.
- Stavarache, C., Vinatoru, M., Maeda, Y. (2006). Ultrasonic versus silent methylation of vegetable oils. *Ultrasonics Sonochemistry* 13: 401-407.
- Strommen, I., Kramer, K. (1994). New applications of heat pumps in drying processes. *Drying Technology* 12: 889-901.

- Strommen, I., Jonassen, O. (1996). Performance tests of a new 2-stage counter-current heat pump fluidized bed dryer. En Proceedings IDS'96, Cracovia, Polonia.
- Strommen, I., Eikevik, T.M., Alves-Filho, O., Syverud, K., Jonassen, O. (2003). Low temperature drying of food products with combined sublimation and evaporation. En Proceedings 2<sup>nd</sup> Nordic Drying Conference, Copenhagen, Dinamarca.
- Strommen, I., Grande, A.S., Eikevik, T.M., Claussen, I.C., Jonassen, O., Magnussen, O.M., Gullsvaag, P.E., Alves-Filho, O. (2006). Method of drying portion pieces of fish and meat products. Patente Internacional WO2006/068499A1.
- Sun, D.W. (1999). Comparison and selection of EMC/ERH isotherm equations for rice. *Journal of Stored Products Research* 35: 249-264.
- Sun, D.W., Li, B. (2003). Microstructural change of potato tissues frozen by ultrasound-assisted immersion freezing. *Journal of Food Engineering* 57: 337-345.
- Taiwo, K.A., Estiaghi, M.N., Ade-Omowaye, B.I.O., Knorr, D. (2003). Influence of osmotic agents and pretreatments methods on mass transfer and product characteristics. *International Journal of Food Science and Technology* 38: 693-707.
- Telis-Romero, J., Gabas, A.L., Menegalli, F.C., Telis, V.R.N. (2001). Drying of persimmon: Mathematical model for diffusivity as a simultaneous function of moisture content and shrinkage. En Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Inter-American Drying Conference, Veracruz, México.
- Teixeira, M.B.F., Tobinaga, S.A. (1998). A diffusion model for describing water transport in round squid mantle during drying with a moisture-dependent effective diffusivity. *Journal of Food Engineering* 36: 169-181.

- Tireki, S., Sumnu, G., Esin, A. (2006). Production of bread crumbs by infrared-assisted microwave drying. *European Food Research and Technology* 222: 8-14.
- Toba, T., Hayasaka, I., Taguchi, S., Adachi S. (1990). A new method for manufacture of lactose-hydrolysed fermented milk. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 52: 403-407.
- Togrul, I.T., Pehlivan, D. (2003). Modelling of drying kinetics of single apricot. *Journal of Food Engineering* 58: 23-32.
- Toma, M., Vinatoru, M., Paniwnyk, L., Mason, T.J. (2001). Investigation of the effects of ultrasound on vegetal tissues during solvent extraction. *Ultrasonics Sonochemistry* 8: 137-142.
- Tsami, E., Maroulis, Z.B., Marinos-Kouris, D., Saravacos, G.D. (1990) Heat sorption of water in dried fruits. *International Journal of Food Science & Technology* 25: 350-359.
- Turner, I.W., Jolly, P. (1991). Combined microwave and convective drying of a porous material. *Drying Technology* 9: 1209-1270.
- Ugarte-Romero, E., Feng, H., Martin, S.E., Cadwallader, K.R., Robinson, S.J. (2006). Inactivation of *Escherichia coli* with power ultrasound in apple cider. *Journal of Food Science* 71: E102-E108.
- Vega-Mercado, H., Góngora-Nieto, M.M., Barbosa-Canovas, G.V. (2001). Advances in dehydration of foods. *Journal of Food Engineering* 49: 271-289.
- Vercet, A., Sánchez, C., Burgos, J., Montañés, L., López, P. (2002). The effects of manothermosication on tomato pectic enzymes and tomato paste rheological properties. *Journal of Food Engineering* 53: 273-278.
- Waanamen, K.M., Litchfield, J.B., Okos, M.R. (1993). Classification of drying models for porous solids. *Drying Technology* 11: 1-40.

- Walde, S.G., Velu, V., Jyothirmayi, T., Math, R.G. (2006). Effects of pretreatments and drying methods on dehydration of mushroom. *Journal of Food Engineering* 74: 108-115.
- Wan, P.J., Muanda, M., Covey, J.E. (1992). Ultrasonic vs. nonultrasonic hydrogenation in a batch reactor. *Journal of the American Oil Chemist Society* 69: 876-879.
- Wang, J. (2002). A single-layer model far-infrared radiation drying of onion slices. *Drying Technology* 20: 1941-1953.
- Wang, J., Xi, Y.S. (2005). Drying characteristics and drying quality of carrot using a two-stage microwave process. *Journal of Food Engineering* 68: 505-511.
- Wang, J., Sheng, K. (2006). Far-infrared and microwave drying of peach. *LWT-Food Science and Technology* 39: 247-255.
- Wang, W., Chen, C.H. (2003). Numerical investigations on dielectric material assisted microwave freeze-drying of aqueous mannitol solution. *Drying Technology* 21: 995-1017.
- Wen-Jia, L., Raisul-Islam, M., Mujumdar, A.S. (2003). A simulation study on convection and microwave drying of different food products. *Drying Technology* 21: 1549-1574.
- Wrigley, D.M., Llorca, N.G. (1992). Decrease of *Salmonella typhimurium* in skim milk and egg by heat and ultrasonic wave treatment. *Journal of Food Protection* 55: 678-680.
- Wu, H.W., Tao, Z., Chen, G.H., Deng, H.W. (2004). Conjugate heat and mass transfer process within porous media with dielectric cores in microwave vacuum drying of wild cabbage. *Chemical Engineering and Science* 59: 2921-2928.
- Yang, C.Y. (1999). Estimation of the temperature-dependent thermal conductivity in inverse heat conduction problems. *Applied Mathematical Modelling* 23: 469-478.
-

---

**BIBLIOGRAFÍA**

- Zhang, M., Li, C.L., Ding, X.L. (2005). Effect of heating conditions on the thermal denaturation of white mushroom suitable for dehydration. *Drying Technology* 23: 1119-1125.
- Zhang, M., Tang, J., Mujumdar, A.S., Wang, S. (2006). Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables. *Trends in Food Science & Technology* 17: 524-534.
- Zhang, X.W., Liu, X., Gu, D.X., Zhou, W., Wang, R.L., Liu, P. (1996). Desorption isotherms of some vegetables. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 40: 303-306.
- Zheng, L., Sun, D.W. (2006). Innovative applications of power ultrasound during food freezing-a review. *Trends in Food Science and Technology* 17: 16-23.
- Zogzas N.P., Maroulis, Z.B., Marinos-Kouris, D. (1996). Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. *Drying Technology* 14: 2225-2253.

## ANEJO 1. ISOTERMAS DE SORCIÓN DE CORTEZA DE LIMÓN

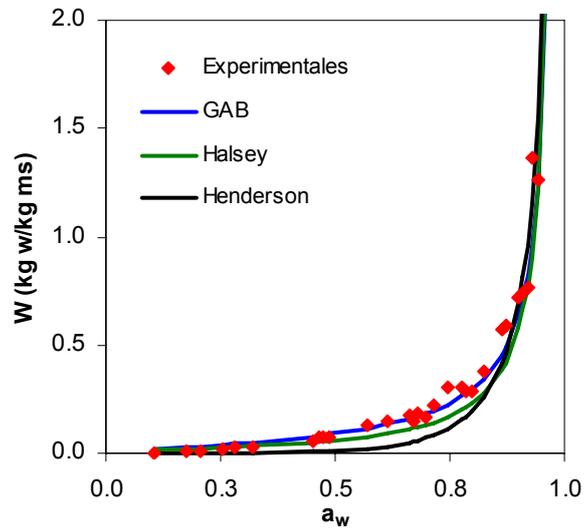


Figura A1.1. Modelización de la isoterma de sorción de corteza de limón a 20 °C con los modelos de GAB, Halsey y Henderson.

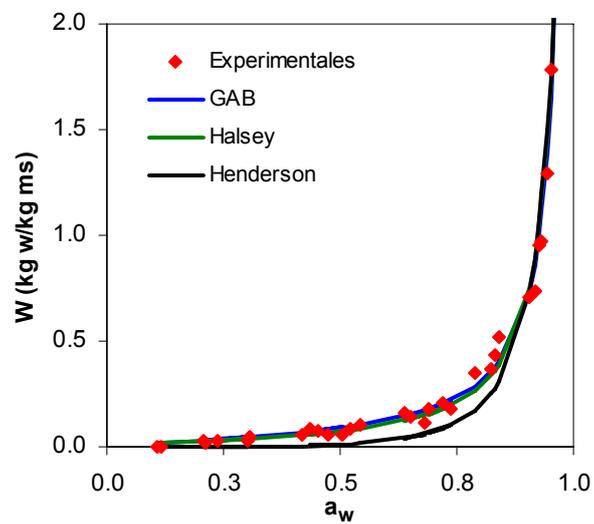


Figura A1.2. Modelización de la isoterma de sorción de corteza de limón a 40 °C con los modelos de GAB, Halsey y Henderson.

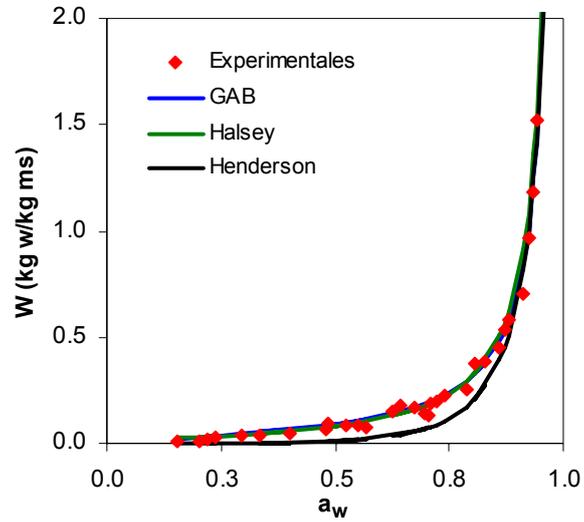


Figura A1.3. Modelización de la isoterma de sorción de corteza de limón a 50 °C con los modelos de GAB, Halsey y Henderson.

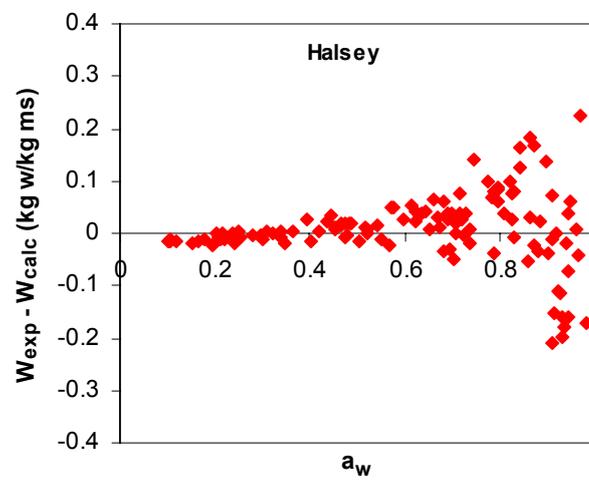


Figura A1.4. Distribución de residuos obtenidos con el modelo de Halsey. Datos experimentales a todas las temperaturas (20, 30, 40 y 50 °C).

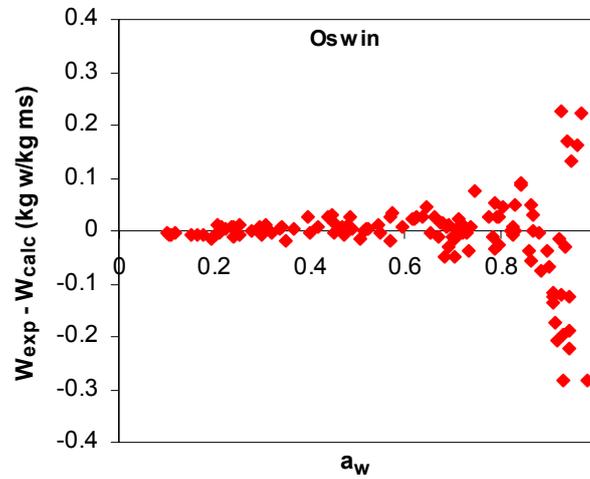


Figura A1.5. Distribución de residuos obtenidos con el modelo de Oswin. Datos experimentales a todas las temperaturas (20, 30, 40 y 50 °C).

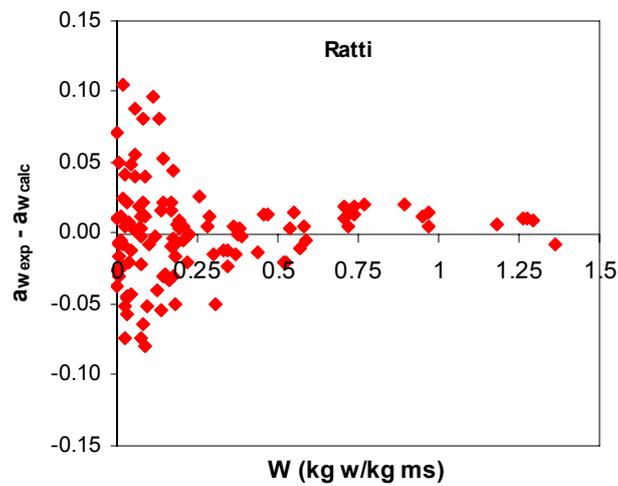


Figura A1.6. Distribución de residuos obtenidos con el modelo de Ratti. Datos experimentales a todas las temperaturas (20, 30, 40 y 50 °C).

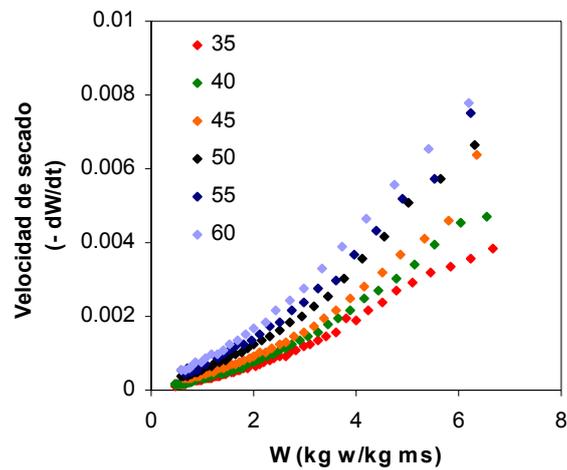
**ANEJO 2. SECADO EN LECHO FLUIDIZADO DE ZANAHORIA Y ALBARICOQUE.**

Figura A2.1. Velocidad de secado de cubos de zanahoria (8.5 mm de lado). Experiencias SUS a diferentes temperaturas (°C).

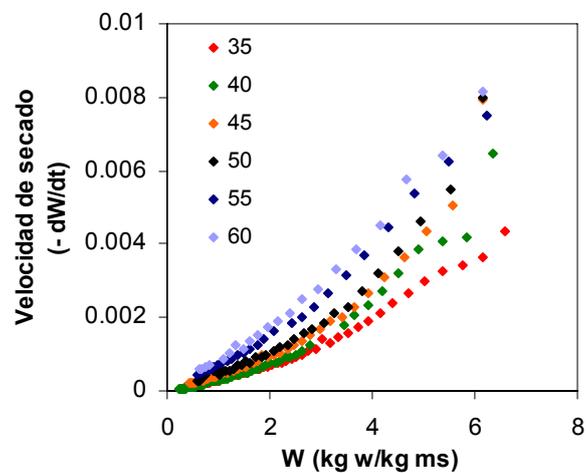


Figura A2.2. Velocidad de secado de cubos de zanahoria (8.5 mm de lado). Experiencias US (75 W, 21.7 kHz) a diferentes temperaturas (°C).

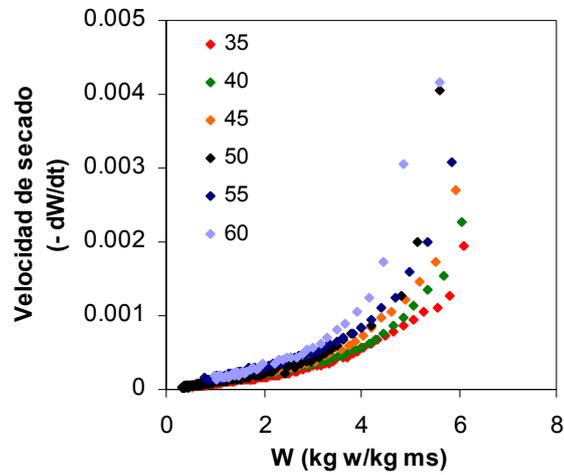


Figura A2.3. Velocidad de secado de octavos de albaricoque. Experiencias SUS a diferentes temperaturas (°C).

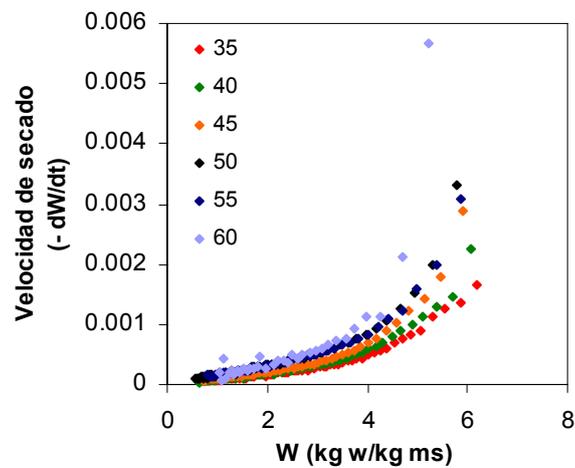


Figura A2.4. Velocidad de secado de octavos de albaricoque. Experiencias US (75 W, 21.7 kHz) a diferentes temperaturas (°C).

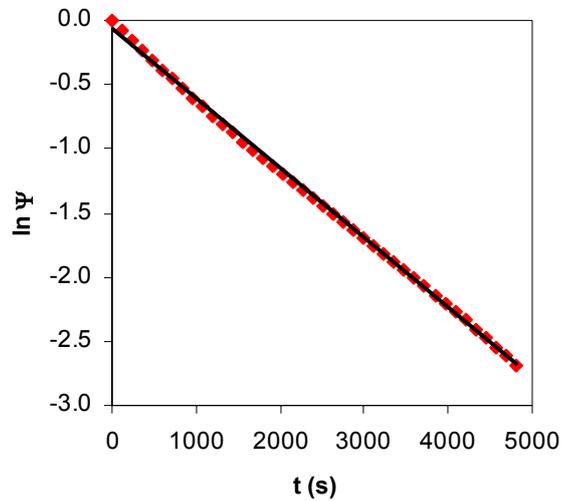


Figura A2.5. Secado de cubos de zanahoria (8.5 mm de lado). Experiencia SUS a 35 °C en lecho fluidizado.

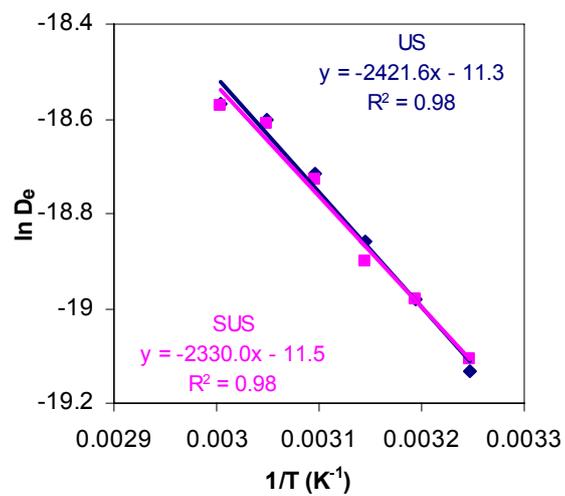


Figura A2.6. Variación de la difusividad efectiva con la temperatura. Secado de octavos de albaricoque en lecho fluidizado.

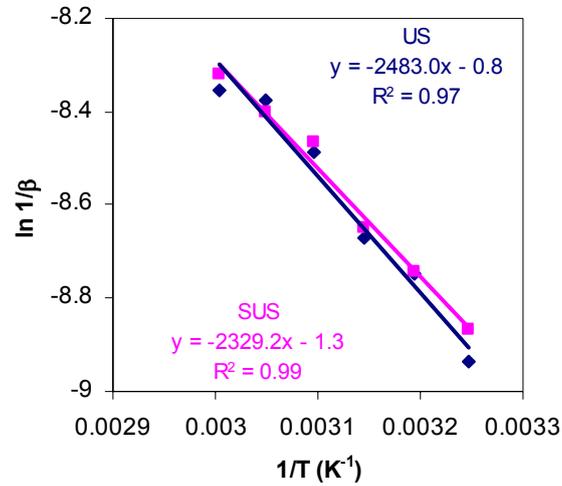


Figura A2.7. Variación de la inversa del parámetro  $\beta$  del modelo de Weibull con la temperatura. Secado de octavos de albaricoque en lecho fluidizado.

Producto	$E_a$ (kJ/mol)	Referencia
Zanahoria	16.0	(Reyes et al., 2002)
Zanahoria-Corazón	24.7	(Srikiatden y Roberts, 2006)
Zanahoria-Córtex	16.5	(Srikiatden y Roberts, 2006)
Zanahoria	28.4	(Doymaz, 2004)
Zanahoria	23.6	(Mulet et al., 1987)
Albaricoque	22.0	(Abdelhaq y Labuza, 1987)
Albaricoque	23.0	(Berna et al., 1990)

Tabla A2.1. Referencias bibliográficas de valores de energía de activación de la zanahoria y el albaricoque.

**ANEJO 3. INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DEL AIRE EN EL SECADO ASISTIDO POR ULTRASONIDOS DE POTENCIA**

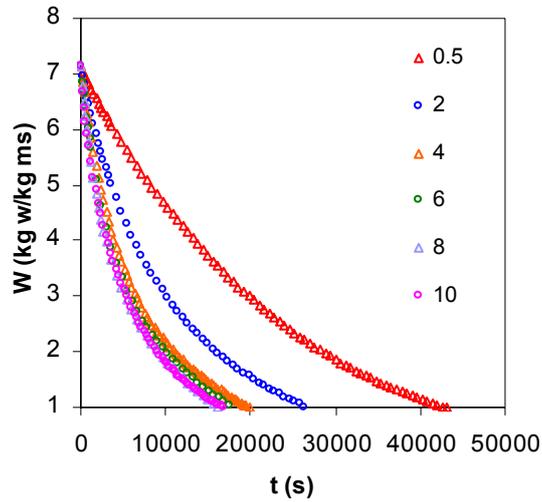


Figura A3.1. Secado de cubos de zanahoria (lado 17 mm). Experiencias SUS a diferentes velocidades de aire (m/s) y 40 °C.

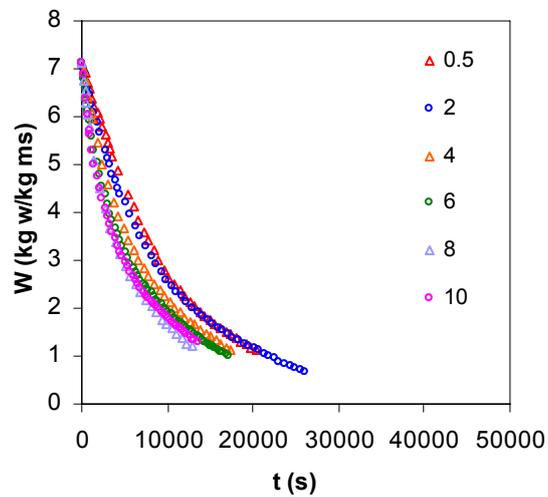


Figura A3.2. Secado de cubos de zanahoria (lado 17 mm). Experiencias US (75 W, 21.7 kHz) a diferentes velocidades de aire (m/s) y 40 °C.

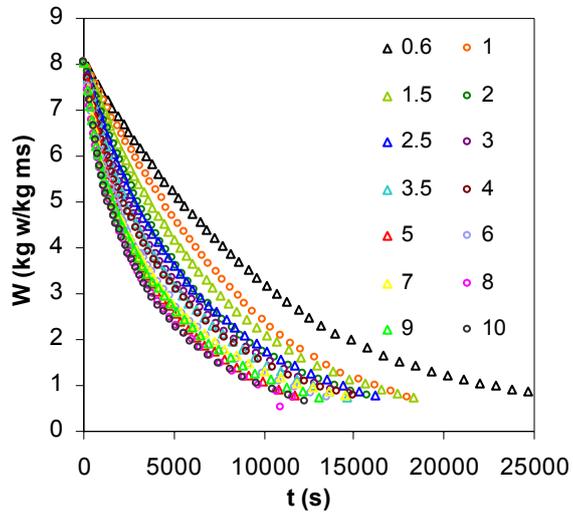


Figura A3.3. Secado de cubos de zanahoria (lado 8.5 mm). Experiencias SUS a diferentes velocidades de aire (m/s) y 40 °C.

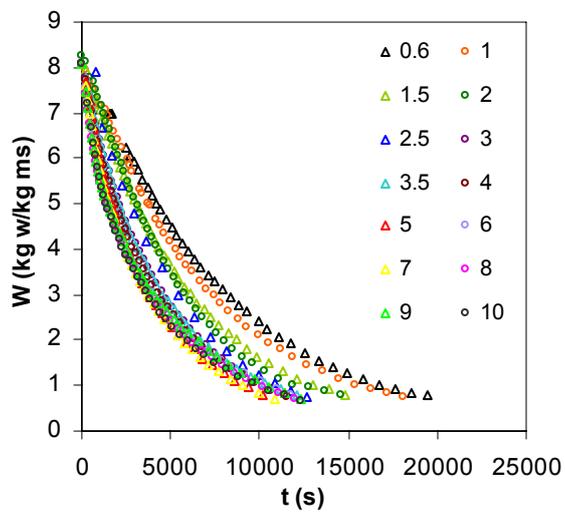


Figura A3.4. Secado de cubos de zanahoria (lado 8.5 mm). Experiencias US (75 W, 21.7 kHz) a diferentes velocidades de aire (m/s) y 40 °C.

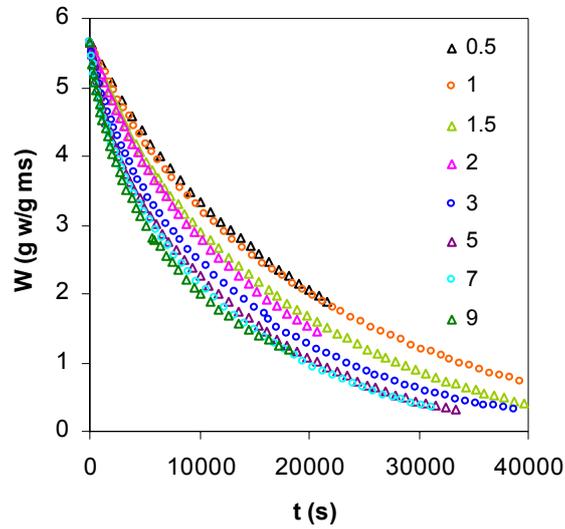


Figura A3.5. Secado de discos de corteza de limón (espesor 10 mm). Experiencias SUS a diferentes velocidades de aire (m/s) y 40 °C.

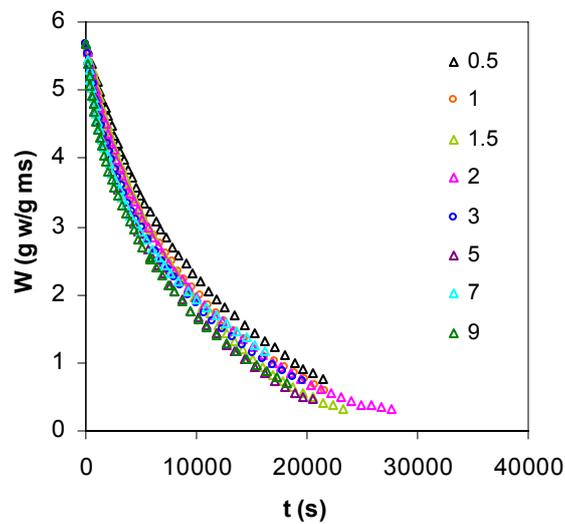


Figura A3.6. Secado de discos de corteza de limón (espesor 10 mm). Experiencias US (75 W, 21.7 kHz) a diferentes velocidades de aire (m/s) y 40 °C.

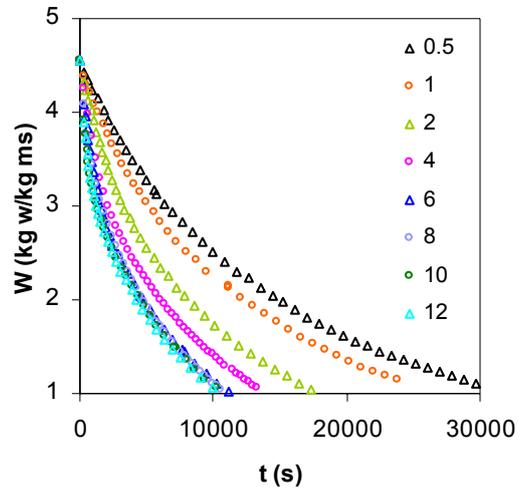


Figura A3.7. Secado de cilindros de caqui (altura 30 mm y diámetro 13 mm). Experiencias SUS a diferentes velocidades de aire (m/s) y 50 °C.

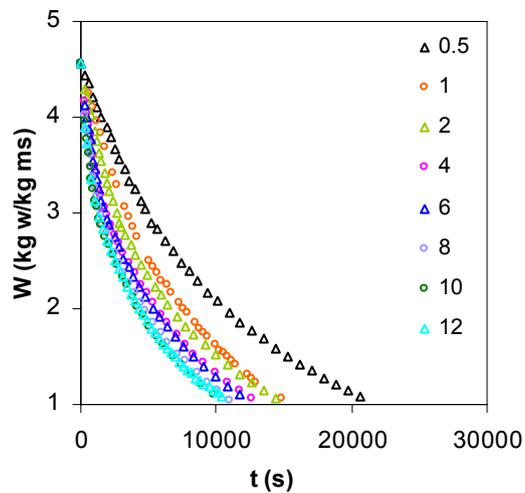


Figura A3.8. Secado de cilindros de caqui (altura 30 mm y diámetro 13 mm). Experiencias US (75 W, 21.7 kHz) a diferentes velocidades de aire (m/s) y 50 °C.

v (m/s)	US		SUS	
	D <sub>e</sub> (10 <sup>-10</sup> m <sup>2</sup> /s)	VAR (%)	D <sub>e</sub> (10 <sup>-10</sup> m <sup>2</sup> /s)	VAR (%)
0.5	4.12	88.3	2.03	90.0
2	4.77	92.4	4.14	94.2
4	5.83	94.0	6.29	96.0
6	7.12	96.3	7.31	96.0
8	7.99	95.6	7.66	96.9
10	7.78	97.3	7.50	95.1

Tabla A3.1. Modelización de las cinéticas de secado de cubos de zanahoria (2L = 17 mm), modelo SRE. Experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz) a 40 °C.

v (m/s)	US		SUS	
	D <sub>e</sub> (10 <sup>-10</sup> m <sup>2</sup> /s)	VAR (%)	D <sub>e</sub> (10 <sup>-10</sup> m <sup>2</sup> /s)	VAR (%)
0.5	1.27	84.3	0.95	87.5
1	1.32	85.9	1.17	84.7
1.5	1.56	86.3	1.33	88.3
2	1.67	84.1	1.54	88.5
2.5	1.90	89.4	1.61	91.1
3	2.15	89.3	1.80	91.9
3.5	2.21	90.1	1.90	92.9
4	2.35	90.9	1.96	93.1
5	2.68	91.6	2.51	93.1
6	2.71	95.2	2.65	94.9
7	2.87	93.2	2.80	95.9
8	2.84	96.2	2.88	95.8
9	2.78	96.5	2.57	96.6
10	2.80	96.3	2.94	95.2

Tabla A3.2. Modelización de las cinéticas de secado de cubos de zanahoria (2L = 8.5 mm), modelo SRE. Experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz) a 40 °C.

v (m/s)	US		SUS	
	D <sub>e</sub> (10 <sup>-10</sup> m <sup>2</sup> /s)	VAR (%)	D <sub>e</sub> (10 <sup>-10</sup> m <sup>2</sup> /s)	VAR (%)
0.5	3.28	90.6	1.22	90.9
1	2.57	90.8	1.75	93.0
1.5	3.04	92.9	2.07	93.1
2	3.33	93.6	2.30	91.4
3	3.32	94.4	2.62	95.8
5	3.88	95.4	3.00	96.7
7	3.23	96.9	3.14	96.7
9	3.95	97.0	2.99	95.7

Tabla A3.3. Modelización de las cinéticas de secado de discos de corteza de limón, modelo SRE geometría cilindro finito (2L = 10 mm y 2R = 18.9 mm). Experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz) a 40 °C.

v (m/s)	US		SUS	
	D <sub>e</sub> (10 <sup>-9</sup> m <sup>2</sup> /s)	VAR (%)	D <sub>e</sub> (10 <sup>-9</sup> m <sup>2</sup> /s)	VAR (%)
0.5	3.42	96.1	1.44	95.2
1	2.79	96.1	1.71	97.6
1.5	3.23	97.5	2.04	97.7
2	3.37	98.0	2.22	96.1
3	3.55	98.3	2.56	99.1
5	4.02	99.8	2.95	99.5
7	3.54	99.2	3.11	99.5
9	4.13	99.4	3.18	99.3

Tabla A3.4. Modelización de las cinéticas de secado de discos de corteza de limón, modelo SRE geometría lámina infinita (L = 10 mm). Experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz) a 40°C.

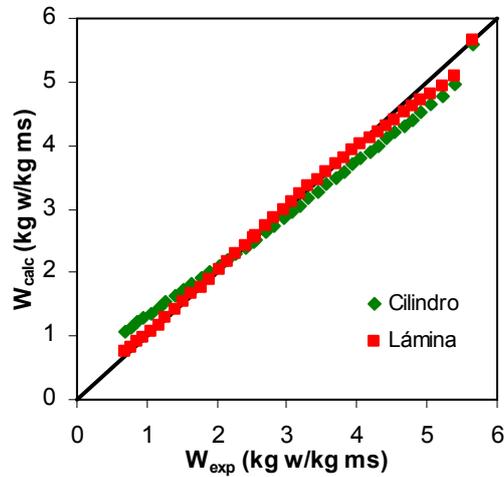


Figura A3.9. Valores experimentales y calculados con los modelos SRE de lámina infinita y cilindro finito, secado de corteza de limón. Experiencia US (75 W, 21.7 kHz) a 9 m/s y 40 °C.

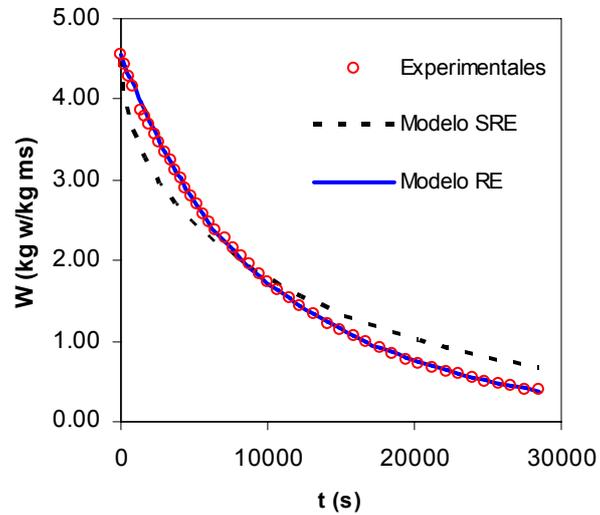


Figura A3.10. Modelización de las cinéticas de secado de caqui con los modelos SRE y RE. Experiencia US a 0.5 m/s y 50 °C.

**ANEJOS**

<b>v</b> (m/s)	<b>US</b>			<b>SUS</b>		
	<b>α</b>	<b>β</b> (10 <sup>3</sup> s)	<b>VAR</b> (%)	<b>α</b>	<b>β</b> (10 <sup>3</sup> s)	<b>VAR</b> (%)
<b>0.5</b>	1.04	10.13	99.9	1.06	21.34	99.9
<b>2</b>	0.94	9.58	99.9	0.89	11.40	99.9
<b>4</b>	0.87	7.70	99.9	0.91	7.58	99.9
<b>6</b>	0.78	6.50	99.9	0.91	6.81	99.9
<b>8</b>	0.80	5.55	99.9	0.77	6.01	99.9
<b>10</b>	0.73	5.80	99.9	0.77	6.09	99.9

**Tabla A3.5. Modelización del secado de cubos de zanahoria (2L = 17 mm), modelo de Weibull. Experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz) a 40 °C.**

<b>v</b> (m/s)	<b>US</b>			<b>SUS</b>		
	<b>α</b>	<b>β</b> (10 <sup>3</sup> s)	<b>VAR</b> (%)	<b>α</b>	<b>β</b> (10 <sup>3</sup> s)	<b>VAR</b> (%)
<b>0.5</b>	1.11	8.18	99.9	1.07	10.64	99.9
<b>1</b>	1.09	7.30	99.9	1.14	8.23	99.9
<b>1.5</b>	1.06	6.12	99.9	1.02	7.41	99.9
<b>2</b>	1.12	5.65	99.9	1.01	6.31	99.9
<b>2.5</b>	1.11	5.35	99.7	0.93	6.19	99.9
<b>3</b>	0.97	4.55	99.9	0.89	5.54	99.9
<b>3.5</b>	0.94	4.47	99.9	0.89	5.28	99.9
<b>4</b>	0.92	4.25	99.9	0.86	5.18	99.9
<b>5</b>	0.90	3.76	99.9	0.86	4.04	99.9
<b>6</b>	0.79	3.86	99.9	0.81	4.37	99.9
<b>7</b>	0.86	3.59	99.9	0.75	4.30	99.9
<b>8</b>	0.77	3.75	99.9	0.78	3.68	99.9
<b>9</b>	0.76	3.81	99.9	0.76	4.08	99.9
<b>10</b>	0.75	3.74	99.3	0.80	3.63	99.9

**Tabla A3.6. Modelización del secado de cubos de zanahoria (2L = 8.5 mm), modelo de Weibull. Experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz) a 40 °C.**

**ANEJOS**

<b>v</b> (m/s)	<b>US</b>			<b>SUS</b>		
	<b>α</b>	<b>β</b> (10 <sup>3</sup> s)	<b>VAR</b> (%)	<b>α</b>	<b>β</b> (10 <sup>3</sup> s)	<b>VAR</b> (%)
<b>0.5</b>	0.99	11.00	99.9	0.95	19.52	99.9
<b>1</b>	0.95	10.56	99.9	0.96	18.40	99.9
<b>1.5</b>	0.9	9.23	99.9	0.95	15.24	99.9
<b>2</b>	0.91	8.92	99.9	0.91	14.46	99.9
<b>3</b>	0.84	8.41	99.9	0.85	11.89	99.9
<b>5</b>	0.83	7.45	99.8	0.81	10.18	99.8
<b>7</b>	0.73	8.61	99.9	0.80	9.68	99.8
<b>9</b>	0.74	7.47	99.9	0.71	9.36	99.9

**Tabla A3.7. Modelización del secado de discos de corteza de limón (2L = 10 mm), modelo de Weibull. Experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz) a 40 °C.**

<b>v</b> (m/s)	<b>US</b>			<b>SUS</b>		
	<b>α</b>	<b>β</b> (10 <sup>3</sup> s)	<b>VAR</b> (%)	<b>α</b>	<b>β</b> (10 <sup>3</sup> s)	<b>VAR</b> (%)
<b>0.5</b>	0.99±0.08	11.54±0.35	99.9	0.92±0.03	15.04±1.37	99.9
<b>1</b>	0.92±0.03	8.77±0.56	99.9	0.94±0.05	13.26±1.05	99.9
<b>2</b>	0.83±0.07	8.11±0.31	99.9	0.81±0.03	9.52±0.77	99.9
<b>4</b>	0.71±0.01	7.10±0.68	99.8	0.70±0.02	7.89±0.27	99.9
<b>6</b>	0.69±0.03	6.33±0.88	99.9	0.66±0.01	6.20±0.64	99.8
<b>8</b>	0.66±0.03	6.24±0.60	99.9	0.68±0.06	5.93±0.75	99.9
<b>10</b>	0.65±0.03	5.65±0.43	99.9	0.64±0.02	5.81±0.49	99.8
<b>12</b>	0.65±0.03	5.55±0.30	99.9	0.62±0.01	5.64±0.33	99.8

**Tabla A3.8. Modelización del secado de cilindros de caqui (2L = 30 mm, R = 6.5 mm), modelo de Weibull. Experiencias SUS y US a 50 °C.**

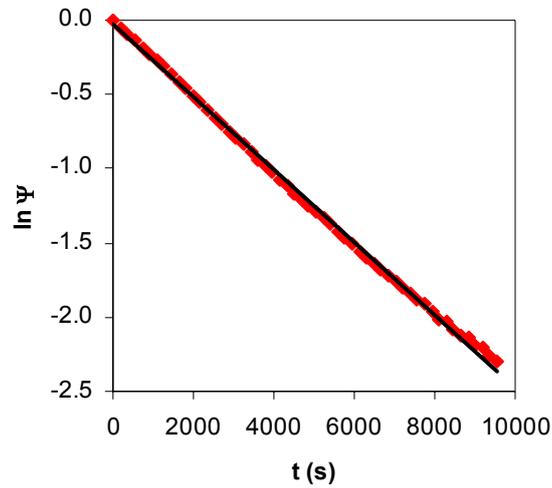
**ANEJO 4. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DEL AIRE EN EL SECADO ASISTIDO POR ULTRASONIDOS DE POTENCIA**

Figura A4.1. Secado de cubos de zanahoria (8.5 mm de lado). Experiencia US (75 W, 21.7 kHz) a 50 °C y 1 m/s.

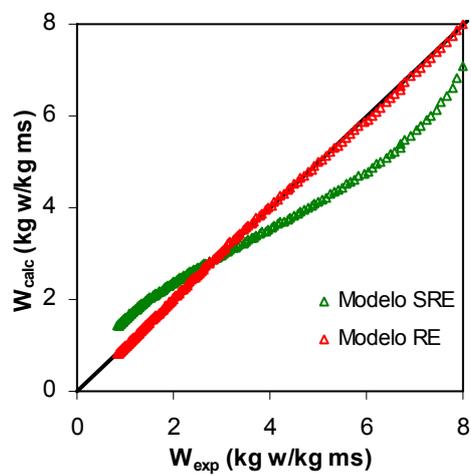


Figura A4.2. Contenido de humedad experimental y calculado con los modelos SRE y RE, secado de zanahoria. Experiencia SUS a 1 m/s y 30 °C.

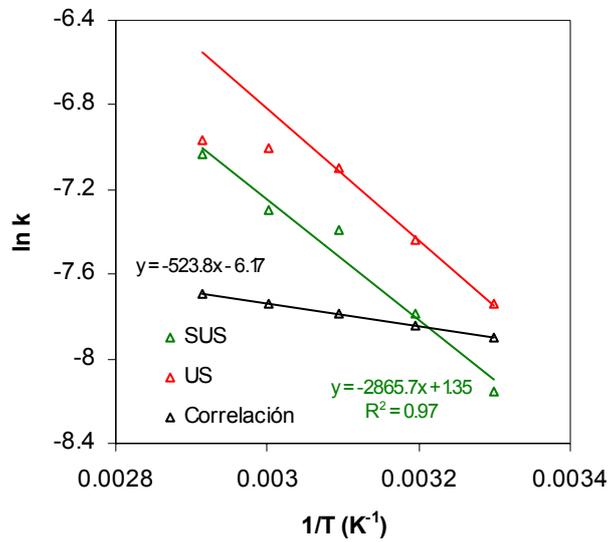


Figura A4.3. Influencia de la temperatura en el coeficiente de transferencia de materia ( $k$ ,  $\text{kg w/m}^2/\text{s}$ ), secado de zanahoria. Experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz) a 1 m/s.

T (°C)	US			SUS		
	$\alpha$	$\beta$ ( $10^3$ s)	VAR (%)	$\alpha$	$\beta$ ( $10^3$ s)	VAR (%)
30	0.99±0.02	13.20±0.55	99.9	0.97±0.06	9.05±0.31	99.9
40	0.93±0.05	8.83±0.13	99.9	0.99±0.06	6.45±0.20	99.9
50	1.04±0.05	5.90±0.37	99.9	1.04±0.89	4.40±0.29	99.9
60	1.01±0.16	5.09±0.55	99.9	1.07±0.47	4.21±0.76	99.9
70	1.02±0.15	3.81±0.20	99.9	1.01±0.11	3.57±0.70	99.9

Tabla A4.1. Modelización de las cinéticas de secado de cubos de zanahoria ( $2L = 8.5$  mm), modelo de Weibull. Experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz) a 1 m/s.

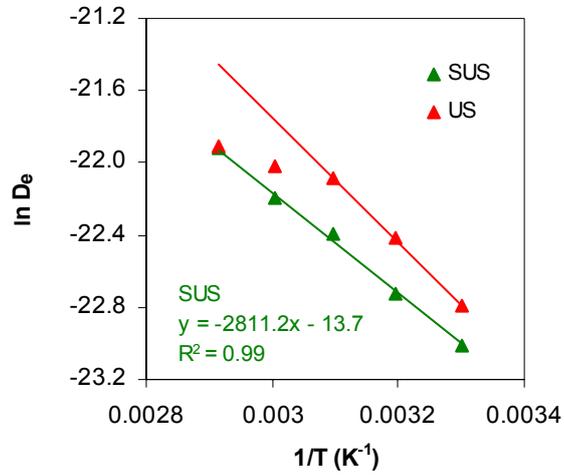


Figura A4.4. Variación de  $D_e$  con la temperatura, modelo SRE. Secado de cubos de zanahoria, experiencias US (75 W, 21.7 kHz) y SUS.

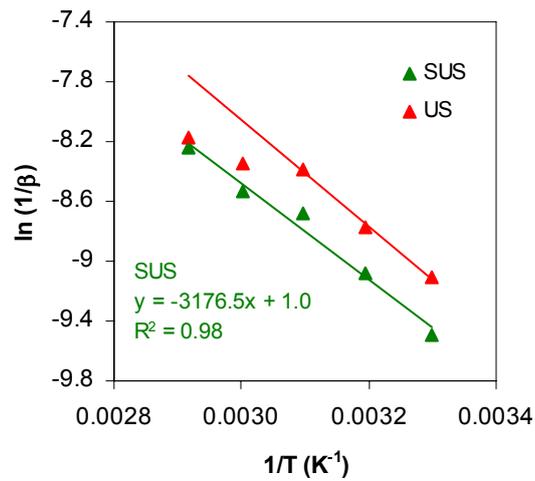
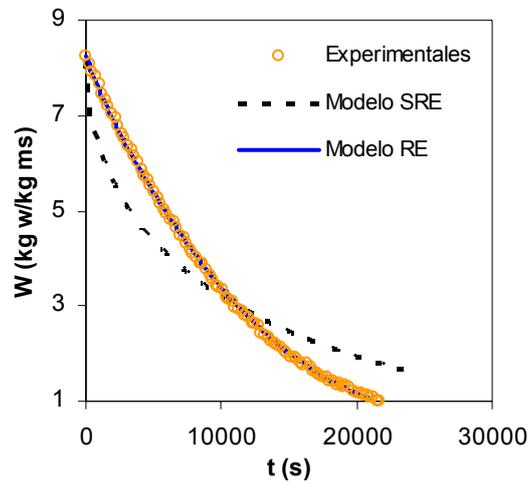
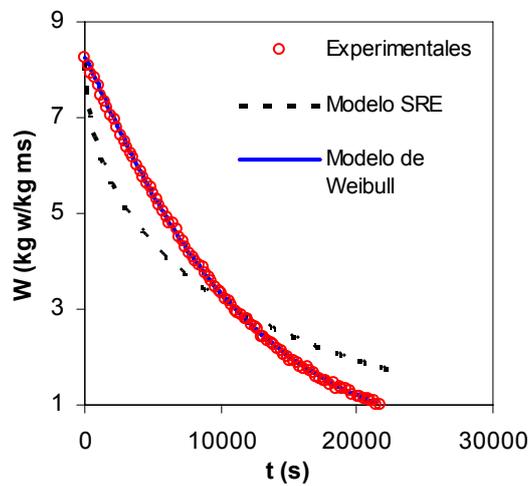


Figura A4.5. Variación de la inversa del parámetro  $\beta$  del modelo de Weibull con la temperatura. Secado de cubos de zanahoria, experiencias US (75 W, 21.7 kHz) y SUS.

**ANEJO 5. INFLUENCIA DE LA DENSIDAD DE CARGA MÁSCA EN EL SECADO ASISTIDO POR ULTRASONIDOS DE POTENCIA**



**Figure A5.1. Cinéticas de secado de zanahoria, modelos SRE y RE. Experiencia SUS a 1 m/s, 40 °C y 60 kg/m<sup>3</sup>.**



**Figure A5.2. Cinéticas de secado de zanahoria, modelos SRE y Weibull. Experiencia SUS a 1 m/s, 40 °C y 60 kg/m<sup>3</sup>.**

Densidad de carga (kg/m <sup>3</sup> )	SUS				US			
	D <sub>e</sub> (10 <sup>-10</sup> m <sup>2</sup> /s)	k (10 <sup>-4</sup> kg w/m <sup>2</sup> /s)	VAR (%)	EMR (%)	D <sub>e</sub> (10 <sup>-10</sup> m <sup>2</sup> /s)	k (10 <sup>-4</sup> kg w/m <sup>2</sup> /s)	VAR (%)	EMR (%)
12	1.84±0.28 <sub>a</sub>	5.28±0.46 <sub>uv</sub>	99.4	5.5	2.51±0.50 <sub>ab</sub>	6.24±0.99 <sub>t</sub>	99.6	4.0
24	2.11±0.80 <sub>a</sub>	4.37±1.07 <sub>uvw</sub>	99.9	2.7	2.76±0.37 <sub>ab</sub>	5.33±0.54 <sub>tuz</sub>	99.6	2.7
36	2.20±0.28 <sub>ab</sub>	3.80±0.80 <sub>vwxz</sub>	99.9	1.5	3.06±0.27 <sub>b</sub>	4.94±0.83 <sub>uvz</sub>	99.9	1.6
42	2.32±0.50 <sub>ab</sub>	3.51±0.20 <sub>vwxzy</sub>	99.9	1.4	2.82±0.66 <sub>ab</sub>	4.82±0.69 <sub>uvz</sub>	99.9	1.2
48	1.97±0.24 <sub>a</sub>	3.58±0.71 <sub>vwxzy</sub>	99.9	1.7	2.54±0.08 <sub>ab</sub>	4.71±0.91 <sub>uvz</sub>	99.9	1.9
60	1.87±0.38 <sub>a</sub>	2.92±0.51 <sub>wxy</sub>	99.9	1.4	2.53±0.26 <sub>ab</sub>	4.39±0.28 <sub>uvwz</sub>	99.9	1.4
72	1.78±0.22 <sub>a</sub>	2.90±0.46 <sub>wxy</sub>	99.9	1.9	2.69±0.03 <sub>ab</sub>	3.93±0.22 <sub>uvwz</sub>	99.9	1.1
84	1.66±0.34 <sub>a</sub>	2.59±0.20 <sub>wxy</sub>	99.8	2.5	3.20±0.21 <sub>b</sub>	3.42±0.55 <sub>vwxzy</sub>	99.9	1.6
96	2.37±0.17 <sub>ab</sub>	2.81±0.36 <sub>wxy</sub>	99.9	1.0	3.46±0.37 <sub>b</sub>	3.11±0.60 <sub>wxy</sub>	99.8	1.9
108	2.31±0.65 <sub>ab</sub>	2.38±0.18 <sub>wxy</sub>	99.9	1.5	3.27±0.37 <sub>b</sub>	2.77±0.21 <sub>wxy</sub>	99.8	2.3
120	2.28±0.61 <sub>ab</sub>	2.10±0.16 <sub>wxy</sub>	99.9	1.5	2.83±0.83 <sub>b</sub>	2.72±0.24 <sub>wxy</sub>	99.8	2.3

Tabla A5.1. Modelización de las cinéticas de secado de cubos de zanahoria (2L = 8.5 mm), modelo RE. Experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz) a 40 °C y 1 m/s. Los subíndices (a, b) y (t, u, v, w, x, y, z) muestran grupos homogéneos establecidos a partir de los intervalos LSD (p<0.05).

Densidad de carga (kg/m <sup>3</sup> )	SUS			US		
	$\alpha$	$\beta$ (10 <sup>3</sup> s)	VAR (%)	$\alpha$	$\beta$ (10 <sup>3</sup> s)	VAR (%)
12	0.90±0.05	7.80±0.57	99.2	0.96±0.01	6.38±0.25	99.3
24	1.03±0.17	8.37±0.79	99.8	1.03±0.02	6.74±0.78	99.7
36	1.05±0.08	9.62±1.53	99.9	1.05±0.10	7.30±0.85	99.9
42	1.07±0.08	9.97±0.85	99.9	1.05±0.02	7.51±1.14	99.9
48	1.07±0.08	10.32±1.49	99.9	1.03±0.05	7.81±1.07	99.9
60	1.09±0.02	11.98±0.23	99.9	1.05±0.01	8.16±0.53	99.9
72	1.08±0.05	12.20±1.96	99.9	1.09±0.01	8.71±1.48	99.9
84	1.08±0.02	13.52±1.36	99.9	1.16±0.06	9.35±1.07	99.9
96	1.06±0.08	11.54±0.53	98.5	1.17±0.03	9.79±1.07	98.5
108	1.20±0.26	13.18±0.27	98.5	1.19±0.09	10.91±1.40	98.4
120	1.18±0.03	14.55±1.21	99.9	1.19±0.05	10.62±1.08	99.9

Tabla A5.2. Modelización de las cinéticas de secado de cubos de zanahoria, modelo de Weibull. Experiencias SUS y US (75 W, 21.7 kHz) a 40 °C y 1 m/s.

**ANEJO 6. INFLUENCIA DE LA POTENCIA APLICADA EN EL SECADO ASISTIDO POR ULTRASONIDOS DE POTENCIA**

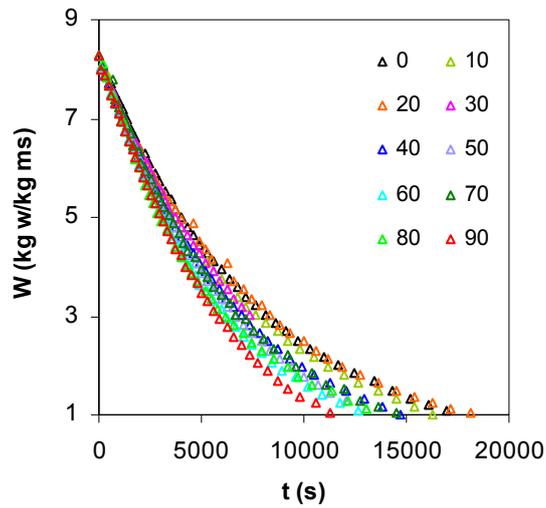


Figura A6.1. Secado de zanahoria ( $12 \text{ kg/m}^3$ ) a  $1 \text{ m/s}$  y  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  variando la potencia aplicada ( $W$ ).

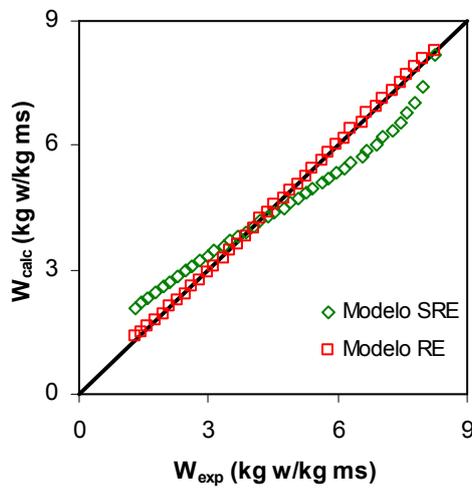


Figure A6.2. Humedad experimental y calculada, modelos SRE y RE, secado de zanahoria. Experiencia US a  $90 \text{ W}$ ,  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $1 \text{ m/s}$  y  $12 \text{ kg/m}^3$ .

P (W)	Zanahoria		Corteza de limón	
	$D_e$ ( $10^{-10}$ m <sup>2</sup> /s)	VAR (%)	$D_e$ ( $10^{-10}$ m <sup>2</sup> /s)	VAR (%)
0	1.20±0.06 <sub>a</sub>	89.2	4.95±0.32 <sub>v</sub>	95.2
10	1.20±0.08 <sub>a</sub>	90.5	5.54±0.35 <sub>v</sub>	94.1
20	1.19±0.03 <sub>a</sub>	89.4	5.53±0.22 <sub>v</sub>	94.6
30	1.19±0.08 <sub>ab</sub>	89.5	8.03±0.06 <sub>w</sub>	97.1
40	1.32±0.09 <sub>ab</sub>	88.4	7.35±0.20 <sub>w</sub>	93.6
50	1.47±0.28 <sub>bc</sub>	90.2	8.10±0.83 <sub>wx</sub>	94.3
60	1.44±0.07 <sub>abcd</sub>	89.0	9.84±0.06 <sub>y</sub>	95.6
70	1.49±0.12 <sub>bcd</sub>	88.9	10.44±0.21 <sub>yz</sub>	95.1
80	1.58±0.13 <sub>bcd</sub>	89.9	9.93±0.93 <sub>xy</sub>	93.9
90	1.68±0.13 <sub>d</sub>	89.6	11.48±0.25 <sub>z</sub>	96.2

**Tabla A6.1. Modelización de las cinéticas de secado de zanahoria y corteza de limón, modelo SRE. Experiencias a 1 m/s y 40 °C.** Los subíndices (a, b, c, d) y (v, w, x, y, z) muestran grupos homogéneos establecidos a partir de los intervalos LSD ( $p < 0.05$ ).

P (W)	Zanahoria			Corteza de limón		
	$\alpha$	$\beta$ ( $10^3$ s)	VAR (%)	$\alpha$	$\beta$ ( $10^3$ s)	VAR (%)
0	0.99±0.01	8.27±0.35	99.9	0.93±0.07	28.55±2.56	99.8
10	0.95±0.04	8.38±0.81	99.9	0.99±0.01	25.02±1.60	99.9
20	0.98±0.06	8.32±0.39	99.9	0.97±0.02	24.32±1.53	99.9
30	1.00±0.10	8.16±0.72	99.9	0.89±0.12	19.69±2.90	99.6
40	1.02±0.01	7.48±0.51	99.9	1.01±0.02	18.68±0.48	99.9
50	0.95±0.12	6.58±0.59	99.9	0.92±0.02	16.53±1.47	99.9
60	1.00±0.03	6.89±0.52	99.9	0.93±0.01	14.26±1.33	99.9
70	0.98±0.05	6.66±0.17	99.9	0.95±0.04	12.96±1.93	99.7
80	0.95±0.04	6.09±0.72	99.9	0.99±0.02	13.71±0.40	99.9
90	0.97±0.10	5.79±0.37	99.9	0.92±0.02	12.50±0.31	99.9

Tabla A6.2. Modelización de las cinéticas de secado de zanahoria y corteza de limón, modelo de Weibull. Experiencias a 1 m/s y 40 °C.

ANEJO 7. LIOFILIZACIÓN A PRESIÓN ATMOSFÉRICA DE BACALAO

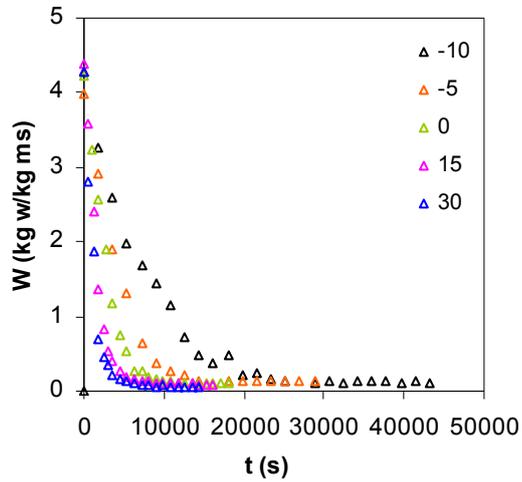


Figura A7.1. Secado de bacalao granulado a diferentes temperaturas (°C).

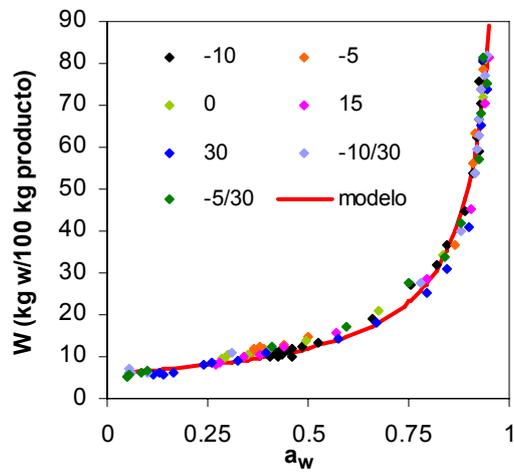


Figura A7.2. Relación experimental entre actividad de agua y humedad a 25 °C para bacalao granulado secado a diferentes temperaturas y modelo de GAB.

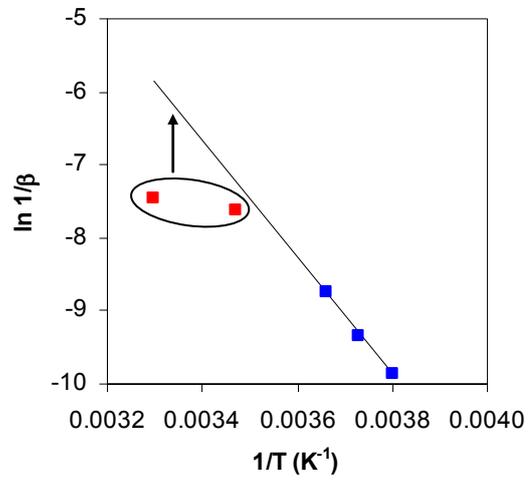


Figura A7.3. Influencia de la temperatura en la inversa del parámetro  $\beta$  del modelo de Weibull, secado de bacalao.

## ANEJO 8. MÉTODO IMPLÍCITO DE LAS DIFERENCIAS FINITAS. APLICACIÓN A LA MODELIZACIÓN DEL SECADO DE ALIMENTOS CONSIDERANDO LA RESISTENCIA EXTERNA

Las ecuaciones de gobierno planteadas, según la teoría difusional, para describir la pérdida de agua durante el secado de alimentos son ecuaciones en derivadas parciales. En la Ec. A8.1 se muestra dicha expresión para el caso concreto de un cilindro finito de altura  $2L$  y radio  $R$ .

$$\frac{\partial W_p(r, x, t)}{\partial t} = D_e \left( \frac{\partial^2 W_p(r, x, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial W_p(r, x, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 W_p(r, x, t)}{\partial x^2} \right) \quad (\text{Ec. A8.1})$$

La Ec. A8.1 es una ecuación en derivadas parciales de segundo orden respecto a las direcciones características  $(r, x)$  y de primer orden respecto al tiempo que no se puede resolver de forma analítica cuando en las condiciones de contorno se tiene en cuenta la influencia de la resistencia externa. En este caso, hay que recurrir a métodos de resolución numéricos, siendo uno de los más comúnmente utilizados el método de diferencias finitas.

El método de las diferencias finitas (Saad, 1995; Clemente, 2003) se basa en aproximaciones locales de las derivadas parciales en ecuaciones algebraicas aplicando series de Taylor de orden inferior. Este método es bastante simple de aplicar, y resulta muy útil para la modelización de geometrías regulares. A continuación se va a describir la resolución de la Ec. A8.1 utilizando el método de diferencias finitas.

La simetría de los cuerpos cilíndricos permite estudiar únicamente  $1/4$  de su volumen, que debe dividirse en una malla de sub-volúmenes equidistantes,  $\Delta r$  en la dirección radial e  $\Delta x$  en la dirección axial. Cada sub-volumen viene caracterizado por su nodo (centro geométrico) cuya posición respecto de los ejes  $r$  y  $x$  queda establecido por los términos  $(i \cdot \Delta r)$  y  $(j \cdot \Delta x)$  respectivamente (Figura A8.1), siendo  $i$  y  $j$  números enteros. Se denominará  $W_p(i, j, t)$  al contenido de humedad de un nodo situado en el punto  $(i \cdot \Delta r, j \cdot \Delta x)$  para un tiempo  $t$ .

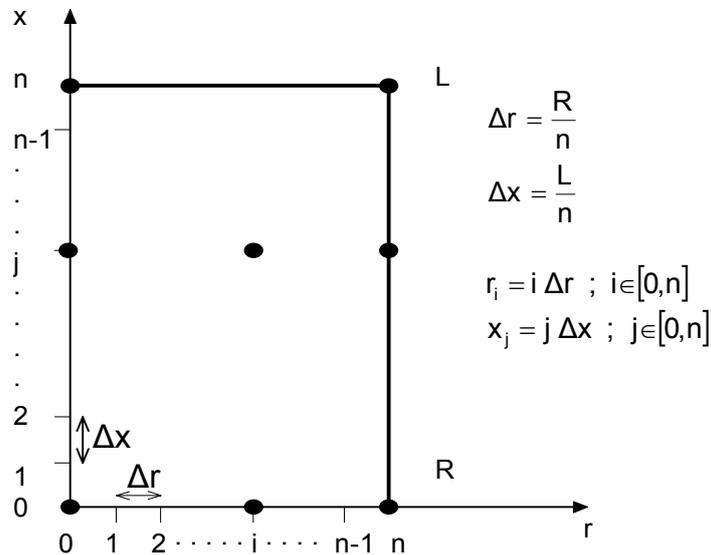


Figura A8.1. Selección de nodos característicos de la región en estudio.

A partir de la Ec. A8.1 y aplicando el método implícito de diferencias finitas se puede obtener la ecuación general que establece el contenido de humedad de un nodo (Ec. A8.2).

$$W_p(i,j,t-\Delta t) = \frac{D_e \Delta t}{\Delta x^2 + \Delta r^2} \left[ \begin{aligned} & W_p(i,j,t) \left( \left( \frac{\Delta x^2 + \Delta r^2}{D_e \Delta t} \right) + 2(\Delta x^2 + \Delta r^2) \right) - \\ & \left( W_p(i,j+1,t) \Delta r^2 + W_p(i,j-1,t) \Delta r^2 + \right. \\ & \left. + W_p(i+1,j,t) \Delta x^2 \left( 1 + \frac{\Delta r}{2r} \right) + \right. \\ & \left. + W_p(i-1,j,t) \Delta x^2 \left( 1 - \frac{\Delta r}{2r} \right) \right) \end{aligned} \right] \quad (\text{Ec. A8.2})$$

La ecuación particular de cada nodo situado en los límites del volumen control considerado deberá obtenerse considerando las respectivas condiciones de contorno. De esta manera, se establece un conjunto de ecuaciones algebraicas implícitas, ya que la humedad de los nodos en un instante  $t-\Delta t$  se expresa en función de la humedad de los nodos en un instante inmediatamente posterior  $t$ . El

sistema, compuesto por  $(n+1) \cdot (n+1)$  ecuaciones e incógnitas, puede representarse en forma matricial (Ec. A8.3).

$$\vec{\tau} = [A]^{-1} \vec{B} \quad (\text{Ec. A8.3})$$

Donde  $\vec{\tau}$  es el vector de variables incógnitas,  $W_p(i,j,t)$ ,  $\vec{B}$  engloba los términos independientes,  $W_p(i,j,t-\Delta t)$ , y las condiciones de contorno, mientras que  $[A]$  es la matriz de coeficientes que se calculan a partir de  $D_e$ ,  $\Delta x$ ,  $\Delta r$  e  $\Delta t$ .

El método de resolución consiste en un cálculo progresivo que parte del tiempo  $t=0$  (condición inicial) e identifica el vector  $\tau$  para un tiempo  $t=\Delta t$ , y así de forma sucesiva hasta llegar al tiempo deseado. Una vez identificado el contenido de humedad de cada nodo para un instante de tiempo determinado se debe integrar respecto a todo el volumen para obtener el contenido de humedad medio del cuerpo. La precisión del método de resolución dependerá del número de nodos seleccionados y del valor del  $\Delta t$ , valores que, a su vez, vendrán determinados por los recursos de cálculo disponibles. En este trabajo se desarrollaron una serie de funciones en Matlab para realizar el cálculo progresivo y determinar la humedad media. En una de estas funciones se utilizó el método Simplex, disponible en la herramienta de Matlab "fminsearch" para la formulación y resolución de problemas de optimización, que permitió identificar los valores de  $D_e$  y  $k$  que minimizaron las diferencias cuadráticas entre los valores de humedad experimentales y calculados.

A continuación se incluyen todas las funciones programadas en Matlab para aplicar el método implícito de diferencias finitas en la resolución de la Ec. A8.1 (geometría de cilindro finito) cuando se tiene en cuenta la resistencia externa a la transferencia de materia.

---

**FUNCIONES PROGRAMADAS EN MATLAB**

```
global Vex u VD R L um options awamb ro um n T dt D
```

---

```
function res = FO(VD)

warning off
cwd = pwd;
cd(tempdir);
pack
cd(cwd)

global awamb Vex ro L R u um n dt;

D=VD(1);
K=VD(2);
dx=L/(n-1);
dr=R/(n-1);

x=zeros(n^2,1);
x(1:n^2,1)=Vex(1,2);

nt=1+round(Vex(end,1)/dt);

u=zeros(nt,n^2);
t=linspace(0,Vex(end,1),nt);
u(1,1:n^2)=Vex(1,2);

A= MatrizA(D,n,dx,dr,dt);

for tiempo=2:nt,
    b=x;
    for i=1:n,
        for j=1:n,
            pos=(i-1)*n+j;
            % Calculo de:  $2 dt K [aw-awamb] / ro dx$ ,
            usando isothermas modelo gab
            un=Gab(b(pos , 1),dt,dx,dr,K,awamb,ro);
            %un=(2*dt*K*(aw-awamb))/(ro*dx)
            % Ecuacion 4
            if i==1 & j==n
                b(pos , 1) = b(pos,1) - un;
            end
        end
    end
end
```

---

```

end
% Ecuacion 6
if i~=1 & i~=n & j==n
    b(pos , 1) = b(pos,1) - un;
end
% Ecuacion 7
if i==n & j==1
    b(pos , 1) = b(pos,1) -
un*dx/dr*(1+1/(2*floor(pos/n)));
end
% Ecuacion 8
if i==n & j~=1 & j~=n
    b(pos , 1) = b(pos,1) -
un*dx/dr*(1+1/(2*floor(pos/n)));
end
% Ecuacion 9
if i==n & j==n
    b(pos , 1) = b(pos,1) -
un/dr*(dr+dx*(1+1/(2*floor(pos/n))));
end %del if
end % del for de j
end % del for de i
x=A\b;
u(tiempo,1:n^2)=x';
end % del for de tiempo

um=mean(u,2);
um=interp1q(t',um,Vex(:,1));

res=sum((Vex(:,2)-um).^2);

hold off

figure(1)
plot(Vex(:,1),Vex(:,2),'b+-',Vex(:,1),um,'r.-')
axis([Vex(1,1) Vex(end,1)+Vex(round(size(Vex,1)*0.1),1)
Vex(size(Vex,1),2)-0.25 Vex(1,2)+Vex(1,2)*0.05])
title('Modelo calculado por Diferencias Finitas Metodo
Implicito para cilindros-Rext')
xlabel('Tiempo t en segundos')
ylabel('Humedad u en KgW/Kgss')
legend('Datos experimentales','Datos del modelo',3)
xmin=Vex(round(size(Vex,1)*0.5),1);
ymin=Vex(1,2)-Vex(size(Vex,1),2);
text(xmin , Vex(1,2)-ymin*0.1 , sprintf('De = Constante'))

```

```

text(xmin , Vex(1,2)-ymin*0.15 , sprintf('K = K [aw(u) -
awamb]'))
text(xmin , Vex(1,2)-ymin*0.2 , sprintf('De = %6.5d', VD(1)))
text(xmin , Vex(1,2)-ymin*0.25 , sprintf(' K = %6.5f',
VD(2)))
text(xmin , Vex(1,2)-ymin*0.3 , sprintf('FO = %6.5f', res))
pause(1e-10000000000)

```

---

```

function A = MatrizA(D,n,dx,dr,dt)
m=(D*dt)/(dx^2*dr^2);
A=zeros(n^2,n^2);
di=n;
dj=1;
for f=1:n^2,
    if f>n,
        A(f,f)=1+2*m*(dr^2+dx^2);
    else
        A(f,f)=1+2*m*(dr^2+2*dx^2);
    end
end
for i=1:n,
    for j=1:n,
        pos=(i-1)*n+j;
        % Ecuacion 1
        if i~=1 & i~=n & j~=1 & j~=n
            A(pos , pos + dj)= -m*dr^2;
            A(pos , pos - dj)= -m*dr^2;
            A(pos , pos + di)= -
m*dx^2*(1+1/(2*floor(pos/n)));
            A(pos , pos - di)= -m*dx^2*(1-
1/(2*floor(pos/n)));
        end
        % Ecuacion 2
        if i==1 & j~=1 & j~=n
            A(pos , pos + dj)= -m*dr^2;
            A(pos , pos - dj)= -m*dr^2;
            A(pos , pos + di)= -4*m*dx^2;
        end
        % Ecuacion 3
        if i==1 & j==1
            A(pos , pos + dj)= -2*m*dr^2;
            A(pos , pos + di)= -4*m*dx^2;
        end
        % Ecuacion 4
        if i==1 & j==n

```

---

---

```

        A(pos , pos - dj)= -2*m*dr^2;
        A(pos , pos + di)= -4*m*dx^2;
    end
    % Ecuacion 5
    if i~=1 & i~=n & j==1
        A(pos , pos + dj)= -2*m*dr^2;
        A(pos , pos + di)= -
m*dx^2*(1+1/(2*floor(pos/n)));
        A(pos , pos - di)= -m*dx^2*(1-
1/(2*floor(pos/n)));
    end
    % Ecuacion 6
    if i~=1 & i~=n & j==n
        A(pos , pos - dj)= -2*m*dr^2;
        A(pos , pos + di)= -
m*dx^2*(1+1/(2*floor(pos/n)));
        A(pos , pos - di)= -m*dx^2*(1-
1/(2*floor(pos/n)));
    end
    % Ecuacion 7
    if i==n & j==1
        A(pos , pos + dj)= -2*m*dr^2;
        A(pos , pos - di)= -2*m*dx^2;
    end
    % Ecuacion 8
    if i==n & j~=1 & j~=n
        A(pos , pos + dj)= -m*dr^2;
        A(pos , pos - dj)= -m*dr^2;
        A(pos , pos - di)= -2*m*dx^2;
    end
    % Ecuacion 9
    if i==n & j==n
        A(pos , pos - dj)= -2*m*dr^2;
        A(pos , pos - di)= -2*m*dx^2;
    end % del if
end % del for de j
end % del for de i

```

---

```
function cc = Gab(u,dt,dx,dr,K,awamb,ro)
```

```
global T;
```

```

% Modelo de Gab que relaciona la aw con la humedad de
equilibrio del
% producto (aw(u,e,t))

```

---

```

%                               Wm Cg Kg aw
% u = 
$$\frac{Wm \ Cg \ Kg \ aw}{(1 - Kg \ aw) [1 + (Cg - 1) Kg \ aw]}$$

% con los siguientes valores para el caso de caqui
% especificamente
Wm=0.22;
Co=0.37;
Hc=299.97;
Ko=0.95;
Hk=0.29;
R=8.31419;
Ti=273+T;

% Y Cg y Kg dependen asi
Cg=Co*exp(-Hc/(R*Ti));
Kg=Ko*exp(-Hk/(R*Ti));

% una vez despejada la aw
% 
$$aw^2 \ Kg^2 \ (Cg-1) + aw \ Kg \ (2 - Cg(1 - Wm/u)) - 1 = 0$$

% se soluciona con cuadratica y defino variables a, b y c
% como ac, bc y cc.
a=(Kg^2)*(Cg-1);
b=Kg*(2-(Cg*(1-Wm/(u))));
c=-1;

aw=(-b+sqrt(b^2-(4*a*c)))/(2*a);

cc=(2*dt*K*(aw-awamb))/(ro*dx);

```

---

```

function minFO
% Minimizacion de la funcion objetivo FO
warning off
format short g;

global Vex VD L R u um options n dt; %cubo;

[VD,res]=fminsearch('FO',VD,options)

% Grafica de comparacion de datos experimentales vs la media
% de los valores de humedad
% calculados para cada tiempo t
figure(1)

```

---

---

```

plot(Vex(:,1),Vex(:,2), 'b+-')
axis([Vex(1,1)
Vex(max(size(Vex)),1)+Vex(round(max(size(Vex))*0.1),1)
Vex(max(size(Vex)),2)-0.25 Vex(1,2)+Vex(1,2)*0.05])
hold on
plot(Vex(:,1),um, 'r.-')
title('Datos experimentales y Modelo')
xlabel('Tiempo t en segundos')
ylabel('Humedad u en KgW/Kgss')
legend('Datos experimentales', 'Datos del modelo',3)
xmin=Vex(round(max(size(Vex))*0.5),1);
ymin=Vex(1,2)-Vex(max(size(Vex)),2);
text(xmin , Vex(1,2)-ymin*0.1 , sprintf('De = Constante'))
text(xmin , Vex(1,2)-ymin*0.15 , sprintf('K = K [aw(u) -
awamb]'))
text(xmin , Vex(1,2)-ymin*0.2 , sprintf('De = %6.5d', VD(1)))
text(xmin , Vex(1,2)-ymin*0.25 , sprintf(' K = %6.5d',
VD(2)))
text(xmin , Vex(1,2)-ymin*0.3 , sprintf('FO = %6.5f', res))

% Grafica de correlacion de datos experimentales vs
calculados y valor de R^2
figure(2)
coefcorr=corrcoef(Vex(:,2),um);
coefcorr=coefcorr(1,2)*coefcorr(1,2)
xmVex=sum(Vex(:,2))/max(size(Vex));
sy2=sum((Vex(:,2)-xmVex).^2)/(max(size(Vex))-1);
syx2=sum((Vex(:,2)-um).^2)/(max(size(Vex))-max(size(VD))-1);
Var=(1-(syx2/sy2))
EMR=((100/max(size(Vex)))*sum(abs(Vex(:,2)-
um)./Vex(:,2)))/100
plot(Vex(:,2),um, 'r+')
axis tight
hold on
plot(Vex(:,2),Vex(:,2), 'b-')
title('Relacion de los datos experimentales vs datos
calculado')
xlabel('Valores experimentales (KgW/Kgss)')
ylabel('Valores calculados (KGW/Kgss)')
text(Vex(round(size(um,1)/2),2),Vex(2,2),sprintf('R^2 =
%6.5f', coefcorr))
plot(Vex(:,1),um, 'b+-',Vex(:,1),Vex(:,2), 'r.-')

```

---

**ANEJO 9. PUBLICACIONES RELACIONADAS CON LA TESIS DOCTORAL****A9.1. Artículos en revistas listadas en Journal Citation Reports (JCR)**

García-Pérez, J.V., Cárcel, J.A., De la Fuente, S., Riera, E. (2006). Ultrasonic drying of foodstuff in a fluidized bed. Parametric study. *Ultrasonics* 44: e539-e543.

García-Pérez, J.V., Rosselló, C., Cárcel, J.A., De la Fuente, S., Mulet, A. (2006). Effect of air temperature on convective drying assisted by high power ultrasound. *Defect and Diffusion Forum* 258-260: 563-574.

Cárcel, J. A., García-Pérez, J. V., Riera, E., Mulet, A. (2007). Influence of High Intensity Ultrasound on Drying Kinetics of Persimmon. *Drying Technology* 25: 185-193.

García-Pérez, J.V., Cárcel, J.A., Clemente, G., Mulet, A. (2007). Water sorption isotherms for lemon peel at different temperatures and isosteric heats. *LWT-Food Science and Technology* *en prensa*.

García-Pérez, J.V., Cárcel, J.A., Benedito, J., Mulet, A. (2007). Power ultrasound mass transfer enhancement in food drying. *Food and Bioproducts Processing* *en prensa*.

**A9.2. Contribuciones y publicaciones derivadas de la asistencia a congresos científicos**

García-Pérez, J.V., Alves-Filho, O., Eikevik, T.M., Strommen, I., Mulet, A. (2005). Heat pump fluidized bed drying of cod fish. 3<sup>rd</sup> Nordic Drying Conference (NDC'05), Karlstad, Suecia.

*Tipo de contribución:* Presentación oral.

*Publicación:* Proceedings 3<sup>rd</sup> Nordic Drying Conference (NDC'05), ISBN 82-594-2873-3, Volumen electrónico.

García-Pérez, J.V., De la Fuente, S., Riera, E., Simal, S., Mulet, A (2005). Hot air drying assisted by power ultrasound: Effect of air flow rate. Congress of the Association Française de Séchage pour l'industrie et l'Agriculture (AFSIA), París, Francia.

*Tipo de contribución:* Póster.

*Publicación:* Proceedings Congress of the Association Française de Séchage pour l'industrie et l'Agriculture (AFSIA).

García-Pérez, J.V., Alves-Filho, O., Eikevik, T.M., Strommen, I., Mulet, A. (2005). Effect of drying air temperature on heat pump fluidized bed drying of cod fish. Proceedings Congress of the Association Française de Séchage pour l'industrie et l'Agriculture (AFSIA), París, Francia.

*Tipo de contribución:* Póster.

*Publicación:* Proceedings Congress of the Association Française de Séchage pour l'industrie et l'Agriculture (AFSIA).

García-Pérez, J.V., Cárcel, J.A., Riera, E., Gallego-Juárez, J.A., Mulet, A. (2005). Power ultrasonic effect on the drying of carrots. International Conference on Drying and Hygro-Thermal Processing (DHTP), Moscú, Rusia.

*Tipo de contribución:* Presentación oral y póster.

*Publicación:* Proceedings International Conference on Drying and Hygro-Thermal Processing, Vol I: 266-269.

Cárcel, J.A., Bon, J., García-Pérez, J.V., González, R., Mulet, A. (2005). Influence of air velocity on the drying kinetics of persimmon. International Conference on Drying and Hygro-Thermal Processing (DHTP), Moscú, Rusia.

*Tipo de contribución:* Póster.

*Publicación:* Proceedings International Conference on Drying and Hygro-Thermal Processing, Vol I: 222-225.

García-Pérez, J.V., Cárcel, J.A., De la Fuente, S., Riera, E. (2005). Ultrasonic drying of foodstuff in a fluidized bed. World Congress on Ultrasonics-Ultrasonics International, Beijing, China.

*Tipo de contribución:* Presentación oral.

Cárcel, J.A., Benedito, J., García-Pérez, J.V., Golás, Y., Mulet, A. (2005). Heat and mass transfer in high-power ultrasonics. Food Technology Center, El Cairo, Egipto.

*Tipo de contribución:* Presentación oral.

García-Pérez, J.V., Bon, J., Sanjuán, N., De la Fuente, S., Mulet, A. (2006). Mass loading effect on ultrasonic drying of carrots. International Drying Symposium (IDS2006), Budapest, Hungría.

*Tipo de contribución:* Póster.

*Publicación:* Proceedings International Drying Symposium (IDS2006), ISBN 96-394-8358-3, Vol C: 1466-1470.

Cárcel, J.A., Clemente, G., García-Pérez, J.V., Ricarte, B., Mulet, A. (2006). Study of the influence of air velocity on the drying of persimmon using a diffusion model. International Drying Symposium (IDS2006), Budapest, Hungría.

*Tipo de contribución:* Póster.

*Publicación:* Proceedings International Drying Symposium (IDS2006), ISBN 96-394-8358-3, Vol C: 1471-1474.

García-Pérez, J.V., Cárcel, J.A., Bon, J., Simal, S., Mulet, A. (2006). Isothermic heats of sorption of lemon peel. International Drying Symposium (IDS2006), Budapest, Hungría.

*Tipo de contribución:* Póster.

*Publicación:* Proceedings International Drying Symposium (IDS2006), ISBN 96-394-8358-3, Vol C: 1475-1479.

García-Pérez, J.V., Rosselló, C., Cárcel, J.A., De la Fuente, S., Mulet, A. (2006). Effect of air temperature on convective drying assisted by high power ultrasound. 2<sup>nd</sup> International Conference on Diffusion in Solids and Liquids (DSL2006), Aveiro, Portugal.

*Tipo de contribución:* Presentación oral.

García-Pérez, J.V., Cárcel, J.A., Benedito, J., Riera, E., Mulet, A. (2007). Influence of process variables on hot air drying assisted by power ultrasound. 19<sup>th</sup> International Congress on Acoustics (ICA2007), Madrid, España.

*Tipo de contribución:* Presentación oral (aceptado).

García-Pérez, J.V., Cárcel, J.A., Rosselló, C., De la Fuente, S., Mulet, A. (2007). Drying of porous materials as affected by power ultrasound. Congress of the Association Française de Séchage pour l'Industrie et l'Agriculture (AFSIA), Biarritz, Francia.

*Tipo de contribución:* Póster (aceptado).

Mulet, A., Cárcel, J.A., de la Fuente-Blanco, S., Riera-Franco de Sarabia, E., García-Pérez, J.V. (2007). Convective drying of lemon peel assisted by power ultrasound: influence of ultrasonic power applied. International Congress on Ultrasonics (ICU), Viena, Austria.

*Tipo de contribución:* Presentación oral (aceptado).

García-Pérez, J.V., Cárcel, J.A., Benedito, J., Riera, E., Mulet, A. (2007). Drying of low porosity products as affected by power ultrasound. 3<sup>rd</sup> International Conference on Diffusion in Solids and Liquids (DSL2007), Algarve, Portugal.

*Tipo de contribución:* Presentación oral (aceptado).

